



Titre: Navigation semi-autonome d'un fauteuil roulant motorisé en environnements restreints

Auteur: Patrice Boucher

Date: 2010

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Boucher, P. (2010). Navigation semi-autonome d'un fauteuil roulant motorisé en environnements restreints [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/506/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/506/>

Directeurs de recherche: Paul Cohen

Programme: Génie Électrique

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

NAVIGATION SEMI-AUTONOME D'UN FAUTEUIL ROULANT MOTORISÉ EN
ENVIRONNEMENTS RESTREINTS

PATRICE BOUCHER
DÉPARTEMENT DE GÉNIE ÉLECTRIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE ÉLECTRIQUE)
DÉCEMBRE 2010

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

NAVIGATION SEMI-AUTONOME D'UN FAUTEUIL ROULANT MOTORISÉ EN
ENVIRONNEMENTS RESTREINTS

présenté par : BOUCHER, Patrice

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. LESAGE, Frédéric, Ph.D., président.

M. COHEN, Paul, Ph.D., membre et directeur de recherche.

M. GOURDEAU, Richard, Ph.D., membre.

*Je dédie ce mémoire à ma famille,
mes soeurs Christine et Myriam,
ma mère Jacinthe et mon père Roger. . .*

REMERCIEMENTS

Ce travail aurait difficilement abouti sans le support des personnes suivantes.

Mon directeur de recherche, Paul Cohen, a organisé un projet fort intéressant pour ses répercussions scientifiques et sociales, visant la réalisation d'un *fauteuil roulant semi-autonome*. Je le remercie pour le soutien et pour la mise en oeuvre de ce projet qui m'a offert une riche expérience.

J'exprime ma gratitude envers mes confrères de laboratoire, Sousso Kelouwani et Hai Nguyen, qui m'ont apporté une assistance remarquable du début jusqu'à la fin de mes travaux. Ils m'ont libéré des aspects matériels du prototype et m'ont, en somme, grandement facilité l'élaboration du système de navigation. Je remercie également les stagiaires qui ont participé à l'architecture matérielle du fauteuil, les réalisateurs d'*Acropolis*, un outil d'automatisation qui m'a été très pratique, et Audrey Laroche qui révise admirablement les textes en anglais.

Je tiens à remercier l'équipe de professionnels en réadaptation : Wormser Honoré, Paula Stone, Claude Dufour, Jean-Paul Dussault, Daniel Rock, François Routhier, Louise Demers et Robert Forget. Leurs commentaires m'ont été utiles pour définir une assistance à la navigation adaptée aux besoins des usagers. Un merci particulier à Wormser Honoré pour sa participation majeure à la validation du système de navigation. Je remercie l'équipe de McGill, Amin Atrash, Robert Kaplow, Julien Villemure, Robert West et Joëlle Pineau, qui m'ont permis d'étudier l'utilisation du système de navigation avec une interface vocale évoluée.

Je remercie tous les collaborateurs du projet, notamment le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie (CRSNG), le centre de réadaptation Lucie-Bruneau, le centre de réadaptation Constance-Lethbridge, le centre de recherche interdisciplinaire en réadaptation du Montréal métropolitain (CRIR), Robovic et Sunrise Medical. Je remercie encore le CRSNG d'avoir subventionné mes études.

Je salue enfin tout ceux qui ont participé à la vitalité de ces années, soient mon Trio Populaire, mes amis de l'association étudiante, mes camarades de hockey, tous mes amis de Terre-Neuve, mes soeurs Christine et Myriam, mes parents Jacinthe St-Pierre et Roger Boucher, ces derniers m'ayant soutenu avec d'excellentes fondues et finesses maritimes toutes les fins de semaines.

RÉSUMÉ

Ce travail introduit un système de navigation semi-autonome pour fauteuil roulant motorisé (FRM) visant à assister les personnes à mobilité réduite dans leurs déplacements quotidiens. Différentes fonctionnalités d'assistance à la navigation sont offertes, telles que l'assistance d'évitement de collision et de déblocage lors d'impasses, puis l'exécution de manoeuvres automatiques : de mouvements rectilignes, de suivi de murs, de suivi de personnes, de traversée de passages étroits et de stationnement. Élaboré avec l'appui de professionnels en réadaptation et d'utilisateurs de FRM, le système de navigation proposé se distingue par sa facilité d'appropriation attribuable à des fonctionnalités simples à maîtriser, par sa navigation intuitive, confortable et sécuritaire, puis par ses aptitudes à opérer en environnements restreints, variés et inconnus. Le système est validé à l'aide du WST (Wheelchair Skills Test) en collaboration avec des professionnels en réadaptation du centre Lucie-Bruneau de Montréal. Huit utilisateurs sains et neuf utilisateurs handicapés ont exécuté le test. Les 8.8 kilomètres parcourus sur vingt-cinq heures d'expérimentation ont démontré l'efficacité et la fiabilité de la solution proposée. Les commentaires positifs des utilisateurs confirment l'intérêt des différentes facettes du système. Les expériences ont, en outre, démontré une aptitude exceptionnelle à la réalisation automatique de manoeuvres en environnements restreints, comme lors de passage de portes standards (moins de 90 cm de large) et de stationnement. Ces performances sont rendues possibles en redéfinissant comment une plate-forme mobile doit se mouvoir dans l'espace, réagir aux obstacles, gérer l'incertitude des mesures, compenser l'erreur d'exécution, établir des stratégies valides dans la plupart des contextes liés aux fonctionnalités et, enfin, organiser l'ensemble des fonctionnalités sous une *architecture de contrôle* facilitant leur développement. Ce travail contribue ainsi à la robotique mobile par l'apport d'approches de suivi de séquence de points (et de trajectoires), d'évitement stratégique de collisions et d'impasses, de stationnement parallèle, de traversée de passages étroits, d'autolocalisation en environnement partiellement inconnu et par une architecture de contrôle sous laquelle opère l'ensemble des fonctionnalités. Ces méthodes se distinguent par leur capacité à s'adapter à des contextes variés et restreints, puis par leur simplicité d'utilisation. Chaque approche est étudiée individuellement, puis conjointement dans l'application de fauteuil roulant semi-autonome.

ABSTRACT

This work presents a semi-autonomous navigation system for powered wheelchairs which provides assistance to people with mobility impairments during their activities of daily living. The system has various functionalities such as collision assistance, anti-deadlock assistance, automatic maneuvers including moving on a distance, following a wall, following a person, passing through a narrow passage and parking in restrained areas. Built in regard to the advices of clinicians and wheelchair users, the proposed navigation system is especially easy to run due to a set of easy-to-understand functions providing an intuitive, comfortable and secure navigation. It is capable to operate in various restrained and unknown environments. The system has been validated using the Wheelchair Skills Test (WST) by clinicians from the Lucie-Bruneau rehabilitation center in Montreal. Eight healthy users and nine impaired users have done the test. The 8.8 kilometers covered in 25 hours of experimentation have shown the efficiency and the reliability of the proposed solution. The positive user comments point out the relevance of the different system features. Specifically, the experiments have demonstrated the system's exceptional skills in carrying out automatic maneuvers in restrained environments, such as passing standard doors (width less than 90 cm) and parking. The special system's efficiency to perform in various restrained environments is made possible by redefining how a mobile platform should move, react to obstacles, deal with measurement uncertainties, compensate for execution errors, set up strategies that are applicable in most operation contexts and organize the overall functionalities into an efficient *control architecture*. The work resulting from this investigation contributes to the mobile robotic field by proposing novel approaches for the problems of waypoint-following (and path-following), collision assistance, deadlock avoidance, parallel parking, narrow passages and self-localization, as well as for a special control architecture that underlies all functionalities. All these approaches differ from previous ones in their adaptability to varied and restrained contexts, and for their simplicity of use. The approaches are first studied separately, next jointly in the semi-autonomous navigation system.

TABLE DES MATIÈRES

| | |
|---|-------|
| DÉDICACE | iii |
| REMERCIEMENTS | iv |
| RÉSUMÉ | v |
| ABSTRACT | vi |
| TABLE DES MATIÈRES | vii |
| LISTE DES TABLEAUX | xii |
| LISTE DES FIGURES | xiv |
| LISTE DES ANNEXES | xviii |
| LISTE DES SIGLES ET DES ABRÉVIATIONS | xix |
| CHAPITRE 1 INTRODUCTION | 1 |
| 1.1 Éléments de la problématique | 2 |
| 1.2 Objectifs de recherche | 4 |
| 1.3 Plan du mémoire | 5 |
| CHAPITRE 2 REVUE LITTÉRAIRE | 6 |
| 2.1 La clientèle potentielle des FRMSA | 6 |
| 2.2 Interaction personne-machine | 7 |
| 2.2.1 Compréhension de l'utilisation | 8 |
| 2.2.2 Prévisibilité des comportements | 8 |
| 2.2.3 Cohérence de l'exécution | 9 |
| 2.2.4 Rôle de l'utilisateur et du SNSA | 9 |
| 2.3 Identification des fonctionnalités | 10 |
| 2.3.1 Fonctionnalités de navigation locale | 10 |
| 2.3.2 Fonctionnalités de navigation globale | 12 |
| 2.4 Caractéristiques matérielles | 13 |
| 2.5 Conclusion | 13 |

CHAPITRE 3 GÉNÉRATION DU MOUVEMENT : SUIVI D'UNE SÉQUENCE DE POINTS

| | |
|--|----|
| DE PASSAGE | 14 |
| 3.1 Introduction | 14 |
| 3.2 Exposé du problème | 16 |
| 3.3 Définition du profil de conduite | 16 |
| 3.4 Méthode proposée de suivi de points de passage | 17 |
| 3.4.1 Évaluation de la vitesse angulaire | 18 |
| 3.4.2 Évaluation de la vitesse linéaire | 18 |
| 3.4.3 Limites d'accélération | 22 |
| 3.4.4 Sélection automatique des modes de déplacement | 22 |
| 3.4.5 Vitesses linéaires cibles sur les points de passage | 23 |
| 3.4.6 Changement de cible | 24 |
| 3.5 Analyse de la convergence | 24 |
| 3.5.1 Conditions d'une commande divergente | 24 |
| 3.5.2 Région de convergence des écarts de configuration | 25 |
| 3.6 Planification temporelle | 26 |
| 3.7 Compensation des limitations dynamiques | 27 |
| 3.8 Résultats expérimentaux | 28 |
| 3.8.1 Simulation et écart de configuration relatif aux cibles | 29 |
| 3.8.2 Tests réels et écart de configuration relatif aux segments | 35 |
| 3.9 Conclusion | 42 |

CHAPITRE 4 RÉACTION AUX OBSTACLES : ASSISTANCE STRATÉGIQUE POUR LA NAVIGATION D'UNE PLATE-FORME MOBILE EN LIEUX ENCOMBRÉS

| | |
|--|----|
| 4.1 Introduction | 43 |
| 4.2 Exposé du problème | 45 |
| 4.3 Objectifs de manoeuvres | 45 |
| 4.4 Module d'assistance à l'évitement de collision | 46 |
| 4.4.1 Architecture de contrôle utilisant le module d'assistance | 46 |
| 4.4.2 Architecture du module d'assistance à l'évitement de collision | 47 |
| 4.4.3 Évaluation des distances libres de collision | 48 |
| 4.4.4 Choix de la stratégie optimale | 51 |
| 4.4.5 Calcul des écarts d'objectif | 53 |
| 4.4.6 Limitation de la vitesse d'approche des obstacles | 55 |
| 4.5 Résultats expérimentaux | 57 |
| 4.5.1 Assistance d'un passage de porte | 57 |

| | | |
|--|--|-----|
| 4.5.2 | Assistance d'un suivi de mur, contournement d'un obstacle | 58 |
| 4.6 | Conclusion | 61 |
| CHAPITRE 5 ARCHITECTURE DE CONTRÔLE | | 64 |
| 5.1 | Introduction | 64 |
| 5.2 | Description de l'architecture de contrôle | 69 |
| 5.2.1 | Réalité virtuelle | 69 |
| 5.2.2 | Banque de comportements | 71 |
| 5.2.3 | Processus perceptuels | 71 |
| 5.2.4 | Processus décisionnels | 71 |
| 5.2.5 | Module d'évitement de collision | 72 |
| 5.2.6 | Entrées/sorties et simulations | 73 |
| 5.2.7 | Inconvénients | 73 |
| 5.3 | Conclusion | 73 |
| CHAPITRE 6 MANOEUVRE ÉVOLUÉE 1 : TRAVERSÉE DE PASSAGES ÉTROITS | | 75 |
| 6.1 | Introduction | 75 |
| 6.2 | Exposé du problème | 77 |
| 6.3 | Méthode de traversée de passages étroits proposée | 78 |
| 6.3.1 | Identification du passage par analyse spatio-fréquentielle | 78 |
| 6.3.2 | Extraction du chemin discret traversant le passage | 80 |
| 6.3.3 | Suivi et mise à jour du chemin | 81 |
| 6.4 | Expérimentations | 83 |
| 6.4.1 | Extraction de la courbe caractéristique et du chemin | 83 |
| 6.4.2 | Exécution d'un passage | 85 |
| 6.4.3 | Exécution d'un passage à l'aide de stratégies de déblocage | 85 |
| 6.5 | Conclusion | 88 |
| CHAPITRE 7 MANOEUVRE ÉVOLUÉE 2 : STATIONNEMENT | | 90 |
| 7.1 | Introduction | 90 |
| 7.2 | Exposé du problème | 91 |
| 7.3 | Pose cible liée à la commande de stationnement | 92 |
| 7.3.1 | Évaluation de la pose cible | 92 |
| 7.3.2 | Actualisation de la pose cible | 96 |
| 7.4 | Stratégie de stationnement | 96 |
| 7.5 | Expérimentation | 99 |
| 7.5.1 | Simulation | 100 |

| | | |
|--|--|-----|
| 7.6 | Conclusion | 100 |
| CHAPITRE 8 AUTOLOCALISATION D'UNE PLATE-FORME MOBILE EN ENVIRON- | | |
| | NEMENT PARTIELLEMENT DYNAMIQUE | 102 |
| 8.1 | Introduction | 102 |
| 8.2 | Énoncé du problème | 104 |
| 8.3 | Technique d'appariement de points 2D | 105 |
| 8.3.1 | Registration | 105 |
| 8.3.2 | Transformations homogènes | 105 |
| 8.3.3 | Sommaire de l'algorithme | 110 |
| 8.4 | Localisation par filtre de Kalman étendu | 110 |
| 8.4.1 | Description du filtre de Kalman | 110 |
| 8.4.2 | Modèle dynamique | 112 |
| 8.4.3 | Modèle d'observation basé sur l'association de points 2D | 112 |
| 8.5 | Résultats expérimentaux | 113 |
| 8.5.1 | Recalage géométrique, simulations | 114 |
| 8.5.2 | Tests expérimentaux | 114 |
| 8.6 | Conclusion | 115 |
| CHAPITRE 9 SYSTÈME DE NAVIGATION SEMI-AUTONOME PROPOSÉ | | |
| 9.1 | Rapport personne-machine | 118 |
| 9.2 | Architecture de contrôle du SNSA | 120 |
| 9.2.1 | Réalité virtuelle | 121 |
| 9.2.2 | Processus perceptuels | 123 |
| 9.2.3 | Banque de comportements | 124 |
| 9.2.4 | Processus décisionnels | 125 |
| 9.2.5 | Module d'assistance stratégique | 127 |
| 9.2.6 | Contrôleur dynamique PID | 127 |
| 9.2.7 | Entrées/sorties et simulation | 127 |
| 9.3 | Prototype | 128 |
| 9.4 | Conclusion | 128 |
| CHAPITRE 10 EXPÉRIMENTATIONS | | |
| 10.1 | Contexte d'expérimentation | 130 |
| 10.1.1 | Test de validation WST | 130 |
| 10.1.2 | Procédure de test avec les usagers | 130 |
| 10.1.3 | Configuration | 132 |

| | |
|---|-----|
| 10.2 Résultats et discussion | 134 |
| 10.2.1 Résultat du WST | 134 |
| 10.2.2 Interaction personne-machine | 135 |
| 10.2.3 Comportements de navigation | 139 |
| 10.3 Conclusion | 146 |
| CHAPITRE 11 CONCLUSION | 147 |
| 11.1 Synthèse des travaux | 147 |
| 11.2 Limitations de la solution proposée | 149 |
| RÉFÉRENCES | 150 |
| ANNEXES | 161 |
| A.1 Évaluation de la vitesse angulaire | 161 |
| A.2 Évaluation de la vitesse linéaire | 162 |
| A.3 Rayons de divergence selon l'écart de configuration | 163 |
| A.4 Identification du rayon de divergence | 164 |
| A.5 Calcul du coefficient de décroissance minimal en fonction d'un écart de configuration | 165 |

LISTE DES TABLEAUX

| | | |
|--------------|--|-----|
| Tableau 2.1 | Aperçu des caractéristiques de FRMSA récents. | 7 |
| Tableau 3.1 | Paramètres du profil de conduite. | 17 |
| Tableau 3.2 | Zone de divergence selon l'angle et la distance critique | 25 |
| Tableau 3.3 | Valeur minimale du coefficient de décroissance de la vitesse linéaire β assurant la convergence. | 27 |
| Tableau 3.4 | Profils de conduite utilisés pour les expérimentations. | 30 |
| Tableau 3.5 | Écart-type entre la consigne en vitesse linéaire et angulaire selon la dynamique du système et la compensation utilisée. | 36 |
| Tableau 3.6 | Statistiques des 10 parcours obtenus pour chaque contrainte de temps imposée. | 41 |
| Tableau 4.1 | Objectifs généraux des manoeuvres | 46 |
| Tableau 4.2 | Calculs des écarts d'objectif | 56 |
| Tableau 4.3 | Mouvements alternatifs utilisés dans le module d'assistance stratégique. . . | 57 |
| Tableau 9.1 | Commandes de l'utilisateur disponibles. | 125 |
| Tableau 10.1 | Configuration des trois profils de conduite. | 133 |
| Tableau 10.2 | Envergure des expérimentations réalisées avec le WST. | 135 |
| Tableau 10.3 | Résultat du WST | 135 |
| Tableau 10.4 | Résultats, durée et nombre d'accrochages moyen du WST en fonction de l'interface de commande utilisée (usagers sains). | 138 |
| Tableau 10.5 | Nombre de contacts par kilomètre parcouru, avec et sans l'assistance du SNSA. | 143 |
| Tableau 10.6 | Statistiques sur l'emploi des fonctionnalités d'assistance. | 145 |
| Tableau 10.7 | Fiabilité et sécurité des tâches évoluées. | 146 |
| Tableau D.1 | Statistiques d'exécution du WST par la manette standard du FRM, sans assistance. | 171 |
| Tableau D.2 | Distribution de la vitesse linéaire lors de l'exécution du WST par la manette standard du FRM. | 172 |
| Tableau D.3 | Distribution de la vitesse angulaire lors de l'exécution du WST par la manette standard du FRM. | 173 |
| Tableau D.4 | Résultat du WST des usagers sains avec l'assistance du SNSA selon l'interface de commande utilisée. | 174 |
| Tableau D.5 | Résultat du WST des usagers handicapés avec l'assistance du SNSA avec la commande vocale. | 175 |

| | | |
|--------------|---|-----|
| Tableau D.6 | Distribution de la vitesse linéaire lors de l'exécution du WST à l'aide du SNSA. | 176 |
| Tableau D.7 | Distribution de la vitesse angulaire lors de l'exécution du WST à l'aide du SNSA. | 177 |
| Tableau D.8 | Statistiques de la fonctionnalité de commande continue assistée. | 178 |
| Tableau D.9 | Statistiques de la fonctionnalité de traversée de passages étroits. | 179 |
| Tableau D.10 | Statistiques de la fonctionnalité de stationnement. | 180 |
| Tableau D.11 | Statistiques de la fonctionnalité de pivotement. | 181 |
| Tableau D.12 | Statistiques de la fonctionnalité de mouvements rectilignes. | 182 |
| Tableau D.13 | Statistiques de la fonctionnalité de suivi de murs. | 183 |
| Tableau D.14 | Statistiques de la fonctionnalité de suivi de personnes. | 184 |
| Tableau D.15 | Succès de la manoeuvre de passage de porte du WST. | 185 |
| Tableau D.16 | Succès de la manoeuvre de stationnement du WST. | 186 |

LISTE DES FIGURES

| | | |
|-------------|---|----|
| Figure 3.1 | Un exemple de chemin effectif (en trait continu) associé à une séquence donnée de points de passage. | 16 |
| Figure 3.2 | Représentation de l'écart de configuration. | 20 |
| Figure 3.3 | Effet de la variation du coefficient de décroissance de la vitesse linéaire β sur le chemin effectif obtenu. | 20 |
| Figure 3.4 | Illustration de l'angle d'atterrissage, de la cible et de l'écart d'orientation pour un atterrissage possible (a) et impossible (b). | 22 |
| Figure 3.5 | Paramètres utilisés pour l'évaluation des modes de déplacement et des vitesses cibles sur les points de passage. | 23 |
| Figure 3.6 | Illustration de la deuxième condition de divergence pour un écart angulaire de $\pi/2$ | 26 |
| Figure 3.7 | Champ de mouvement vers un point de passage obtenu en faisant varier l'orientation initiale. | 26 |
| Figure 3.8 | Chemin effectif obtenu avec une séquence de points de passage $\{w_1, w_2, \dots, w_{16}\}$ | 29 |
| Figure 3.9 | Évolution temporelle des vitesses et des écarts lors du suivi d'une séquence de points particulière | 30 |
| Figure 3.10 | Suivi simulé d'une trajectoire spirale. | 32 |
| Figure 3.11 | Vitesses simulées lors du suivi d'une trajectoire spirale. | 32 |
| Figure 3.12 | Suivi simulé de points alignés distancés d'un pas variable. | 32 |
| Figure 3.13 | Suivi simulé de points alignés, lorsque l'accélération maximale est trop faible (de 0.3 rad/s^2). | 32 |
| Figure 3.14 | Suivi simulé du mot <i>BONJOUR</i> pour différents profils de conduite. | 34 |
| Figure 3.15 | Exemple d'échec du suivi occasionné par un non-respect de la condition de convergence. | 34 |
| Figure 3.16 | Convergence de la trajectoire vers la zone de divergence de rayon 0.17 m | 34 |
| Figure 3.17 | Un chemin effectif précis obtenu en ajustant la valeur d'un paramètre | 34 |
| Figure 3.18 | Vitesses obtenues avec compensation dynamique, supposant des pôles $\psi^{lin} = -5 \text{ s}^{-1}$ et $\psi^{ang} = -4 \text{ s}^{-1}$ | 36 |
| Figure 3.19 | Chemin effectif obtenu sans compensation dynamique, supposant un délai $\tau = 0.5$ seconde. | 36 |
| Figure 3.20 | Chemin effectif obtenu avec compensation dynamique, supposant un délai $\tau = 0.5$ seconde. | 36 |

| | | |
|-------------|--|----|
| Figure 3.21 | Vitesses obtenues sans compensation dynamique, supposant un délai $\tau = 0.5$ seconde. | 37 |
| Figure 3.22 | Vitesses obtenues avec compensation dynamique, supposant un délai $\tau = 0.5$ seconde. | 37 |
| Figure 3.23 | Chemin effectif obtenu sans compensation dynamique. | 38 |
| Figure 3.24 | Chemin effectif obtenu avec compensation des pôles seulement. | 38 |
| Figure 3.25 | Chemin effectif obtenu avec compensation du délai seulement. | 38 |
| Figure 3.26 | Chemin effectif obtenu avec compensation du délai et des pôles. | 38 |
| Figure 3.27 | Suivi d'une séquence de points alignés, sans compensation dynamique et avec l'écart de configuration relatif aux segments. | 38 |
| Figure 3.28 | Suivi d'une séquence de points alignés, avec compensation dynamique et l'écart de configuration relatif aux segments. | 38 |
| Figure 3.29 | Vitesses relatives au suivi d'une séquence de points alignés par le FRM, sans compensation dynamique et avec l'écart de configuration relatif aux segments. | 39 |
| Figure 3.30 | Vitesses relatives au suivi d'une séquence de points alignés par le FRM, avec compensation dynamique et l'écart de configuration relatif aux segments. | 39 |
| Figure 3.31 | Suivi d'une trajectoire avec écart relatif aux segments sur le FRM. | 41 |
| Figure 3.32 | Suivi d'une trajectoire spirale avec écart relatif aux segments sur le FRM. | 41 |
| Figure 3.33 | Dix trajectoires obtenues pour chaque contrainte de temps (a) 50, (b) 70 et (c) 100 secondes. | 41 |
| Figure 4.1 | Architecture de contrôle locale utilisant le module d'assistance stratégique à l'évitement de collision. | 47 |
| Figure 4.2 | Architecture du module d'assistance stratégique à l'évitement de collision. | 48 |
| Figure 4.3 | Paramètres utiles au calcul d'une distance libre de collision d'un point de contour c_i , pour une vitesse angulaire non nulle. | 50 |
| Figure 4.4 | Machine à états du système de déblocage stratégique. | 52 |
| Figure 4.5 | Comparaison de deux stratégies selon les besoins de transfert spatial. Concernant l'objectif d'orientation, $S^{(1)}$ apparaît préférable à $S^{(2)}$, tandis que pour le besoin de rapprochement, $S^{(2)}$ est préférable à $S^{(1)}$ | 55 |
| Figure 4.6 | Assistance d'un passage de porte complexe commandé de façon rudimentaire. | 59 |
| Figure 4.7 | Évolution temporelle des vitesses linéaires, des vitesses angulaires et de la stratégie sélectionnée pour l'assistance d'un passage de porte. | 60 |
| Figure 4.8 | Contournement d'obstacle. | 62 |

| | | |
|-------------|--|----|
| Figure 4.9 | Vitesses et stratégies sélectionnées lors d'un contournement d'obstacle réussi. | 62 |
| Figure 4.10 | Vitesses et stratégies sélectionnées lors d'un cycle de mouvements répétitifs. | 63 |
| Figure 5.1 | Architecture classique horizontale. | 65 |
| Figure 5.2 | Architecture hiérarchique de Payton. | 66 |
| Figure 5.3 | Architecture de Brooks (<i>Subsumption Architecture</i>) | 66 |
| Figure 5.4 | Architecture à trois niveaux. | 68 |
| Figure 5.5 | Architecture de contrôle proposée. | 70 |
| Figure 5.6 | Utilisation de l'architecture de contrôle à des fins de simulation. | 74 |
| Figure 6.1 | Obtention d'un ensemble de points relatifs aux premiers obstacles contraignant le mouvement | 79 |
| Figure 6.2 | Sinusoïde dont la demi-période spatiale correspond à la largeur de la plateforme. | 81 |
| Figure 6.3 | Extraction de la courbe caractéristique des obstacles frontaux. | 82 |
| Figure 6.4 | Illustration de la hauteur d'un sommet relativement à sa <i>base locale</i> . La hauteur correspond à la longueur minimale entre la base de gauche et de droite. | 82 |
| Figure 6.5 | Exemple d'extraction des sommets d'une courbe S_2 et de leurs profondeurs. | 83 |
| Figure 6.6 | Évaluation de la trajectoire utile au passage de porte | 84 |
| Figure 6.7 | Pose utilisée dans la méthode de suivi de séquence de points. | 85 |
| Figure 6.8 | Exemples d'extraction de courbes caractéristiques et de trajectoires pour différents scénarios. | 86 |
| Figure 6.9 | Passage d'une porte entrouverte. | 87 |
| Figure 6.10 | Évolution des vitesses lors du passage d'une porte entrouverte. | 87 |
| Figure 6.11 | Réalisation d'un passage exigeant l'intervention de stratégies de déblocage. | 89 |
| Figure 6.12 | Évolution des vitesses lors du passage exigeant l'intervention de stratégies de déblocage. | 89 |
| Figure 7.1 | Illustration de la pose cible pour un stationnement à gauche | 92 |
| Figure 7.2 | Illustration du problème de stationnement. | 93 |
| Figure 7.3 | Première sélection des points pour construire la droite d'obstacle. | 93 |
| Figure 7.4 | Sélection des points d'intérêt Q^* pour un stationnement à gauche (a) et construction de la droite d'obstacle $D^{(obs)}$ en (b). Les points d'intérêt appartiennent aux premiers obstacles contraignant le mouvement. | 95 |
| Figure 7.5 | Détermination des droites d'obstacles devant et derrière la cible. | 95 |
| Figure 7.6 | Machine à état responsable du stationnement. | 97 |
| Figure 7.7 | Illustration de la réaction préférentielle de contournement pour un alignement avant (a) et arrière (b), lorsque les obstacles sont à droite. | 98 |

| | | |
|-------------|---|-----|
| Figure 7.8 | Exemple de stationnement en parallèle. | 101 |
| Figure 7.9 | Évolution temporelle des états, des vitesses et des stratégies d'assistance. . | 101 |
| Figure 8.1 | Localisation par fusion multisensorielle. | 104 |
| Figure 8.2 | Relation entre points réels, virtuels et leurs estimations. | 106 |
| Figure 8.3 | Environnement contrôlé de navigation. | 113 |
| Figure 8.4 | Environnement de navigation comportant des objets inattendus. | 114 |
| Figure 8.5 | Temps d'exécution en fonction de la taille N des ensembles de points. . . . | 114 |
| Figure 8.6 | Trajectoires estimées de la plate-forme dans l'environnement de navigation. | 116 |
| Figure 8.7 | Estimation de la pose de la plate-forme lorsqu'elle subit d'importants glissements au sol. | 116 |
| Figure 8.8 | Suivi de pose en présence de glissements et d'objets inconnus. | 117 |
| Figure 8.9 | Exemple d'échec de suivi de pose. | 117 |
| Figure 9.1 | Architecture de navigation utilisée pour l'application de FRMSA. | 122 |
| Figure 9.2 | Fauteuil roulant motorisé adapté, utilisé pour les tests. | 129 |
| Figure 9.3 | Champ de vision du prototype. | 129 |
| Figure 10.1 | Roulement sur un plan incliné descendant. | 131 |
| Figure 10.2 | Roulement sur une surface molle. | 131 |
| Figure 10.3 | Passage d'une porte, face 1. | 131 |
| Figure 10.4 | Passage d'une porte, face 2. | 131 |
| Figure 10.5 | Parcours de 100 mètres dans le couloir. | 131 |
| Figure 10.6 | Transfert latéral, stationnement en lieu encombré. | 131 |
| Figure 10.7 | Périmètre du prototype considéré pour l'évitement de collision. | 133 |
| Figure 10.8 | Distribution de la vitesse linéaire et angulaire employée lors d'une navigation non assistée et assistée par le SNSA. | 141 |
| Figure 10.9 | Quantité de tests comportant chaque nombre d'accrochages. | 144 |

LISTE DES ANNEXES

| | | |
|----------|--|-----|
| Annexe A | SUIVI DE SÉQUENCE DE POINTS DE PASSAGE | 161 |
| Annexe B | LOCALISATION | 167 |
| Annexe C | LISTE DES HABILITÉS TESTÉS DU WST | 168 |
| Annexe D | RÉSULTATS DÉTAILLÉS DES TESTS AVEC LES USAGERS | 170 |

LISTE DES SIGLES ET DES ABRÉVIATIONS

| | |
|------|--|
| a | distance de séparation entre l'origine et un point d'occupation |
| av | avant |
| ar | arrière |
| ang | angulaire |
| att | atterrissage |
| b | distance transversale entre un point d'occupation et une trajectoire |
| c | point du périmètre de la plate-forme |
| cmp | de compensation |
| d | distance, désiré |
| dec | décélération |
| dep | déplacement |
| dir | direction |
| h | profondeur |
| i | indice |
| j | indice |
| k | étape |
| lin | linéaire |
| lim | limite |
| m | mode de déplacement (avant/arrière) |
| min | minimal |
| max | maximal |
| mouv | mouvement |
| obs | obstacle |
| p | point réel, prédit |
| pass | passage |
| para | parallèle |
| per | perpendiculaire |
| q | point virtuel |
| r | rayon |
| rob | robot |
| ref | référence |
| s | segment, cible, distance de séparation |

| | |
|---------------|--|
| sign | signe |
| sta | stationnement |
| t | temps, trajectoire |
| v | vitesse linéaire |
| w | point de passage |
| x | coordonné en x |
| y | coordonné en y |
| z | indice |
| A | abstrakteurs d'information |
| C | coût, commande, groupe de points intermédiaire |
| D | distance |
| I | interpréteurs sensoriels |
| J | actualisateurs de la réalité virtuelle |
| M | relatif à un module maître, manoeuvre |
| N | nombre, objectif |
| O | origine |
| P | ensemble de points réels |
| Q | ensemble de points virtuels |
| R | relatif à la réaction aux obstacles |
| S | stratégie, courbe |
| T | durée, direction préférentielle de contournement |
| α | accélération angulaire |
| β | coefficient de décroissance (ou d'atténuation) |
| ε | petite quantité |
| χ | pose |
| η | facteur d'échelle, activation du déblocage stratégique |
| κ | nombre d'itérations, seuil |
| γ | poids |
| λ | exposant de décroissance, sommet |
| ω | vitesse angulaire |
| ϕ | écart angulaire |
| ψ | pôle |
| σ | incertitude |
| τ | distance libre de collision, délai |
| θ | angle |
| ρ | taux d'occupation |

| | |
|----------|---|
| Δ | écart |
| Γ | fonction |
| Ω | accélération angulaire |
| Φ | ensemble de stratégies |
| * | optimal |
| LSC | limite supérieure de contrôle |
| FRM | Fauteuil roulant motorisé |
| FRMSA | Fauteuil roulant motorisé semi-autonome |
| RS | réelle simulée |
| SNSA | Système de navigation semi-autonome |
| WST | Wheelchair Skills test |

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

Ces dernières décennies, énormément d'efforts ont été investis pour améliorer la qualité de vie des personnes atteintes d'incapacités motrices, particulièrement en élaborant des dispositifs visant à accroître leur mobilité. En raison des nombreuses avancées technologiques, une solution attrayante consiste à concevoir des fauteuils roulants motorisés semi-autonomes (FRMSA) pouvant les assister dans leurs déplacements (Simpson, 2005), (Cortes *et al.*, 2007), (Cherubini *et al.*, 2008). Ces systèmes exploitent à la base un fauteuil roulant motorisé (FRM) auquel on a ajouté un système de navigation semi-autonome (SNSA) et des interfaces personne-machine. Les FRMSA développés s'adaptent aux aptitudes des usagers en leur offrant des fonctionnalités variées : d'assistance d'évitement de collision, d'exécution automatique de manoeuvres complexes et d'atteinte automatique de destinations dans l'environnement. L'appropriation d'un tel système par les usagers peut cependant représenter un défi de taille. Sa complexité rend rapidement ardues la compréhension de son utilisation, la prévisibilité de ses comportements et la pertinence de son assistance. Par ailleurs, les systèmes précédents éprouvent des difficultés marquées à naviguer en environnements restreints comme à travers un portique, dans un ascenseur, etc., alors qu'il s'agit d'environnements typiques des milieux de vie des usagers. Il est, en conséquence, essentiel de poursuivre l'effort de recherche afin d'élaborer des solutions plus adaptées à la réalité des personnes à mobilité réduite. Dans cette perspective, des chercheurs de trois universités du Québec ont réuni leurs expertises sur différentes facettes du défi, comprenant : le développement d'un SNSA efficace en lieux variés encombrés et la mise au point d'un FRMSA prototype (École Polytechnique de Montréal), l'élaboration d'une interface personne-machine conviviale basée sur la commande vocale (Université McGill) et la validation du système complet à l'aide de professionnels en réadaptation et d'usagers de FRM (Université de Montréal). L'objectif de la phase actuelle du projet se résume à produire un fauteuil roulant motorisé semi-autonome :

- doté de fonctionnalités permettant la réalisation automatique des tâches nécessaires aux déplacements quotidiens des utilisateurs de FRM en environnements intérieurs ;
- confortable, sécuritaire et efficace en environnements restreints et à priori inconnus par le système ;
- facile à comprendre, à prévoir et conforme aux attentes des usagers.

Dans ces objectifs, les deux premiers relèvent principalement du SNSA. Le troisième relève de l'assistance qu'il fournit et des interfaces de commandes utilisées. Le travail présenté dans ce mémoire

porte sur l'élaboration du SNSA excluant l'aspect matériel¹.

1.1 Éléments de la problématique

Le problème de navigation d'une plate-forme mobile concerne le choix de stratégies menant à la réalisation d'une tâche précise sous un ensemble de contraintes. Ces dernières sont notamment liées à la plate-forme (limites de vitesses, d'accélération, contrôlabilité), à l'environnement (obstacles, objets cibles), à l'application (contrainte de temps, sécurité) et aux préférences des utilisateurs (style de conduite désiré). En général, on dira qu'une stratégie *efficace* conduira à la réalisation de la tâche en respectant au mieux l'ensemble des contraintes. Pour qu'une stratégie soit appréciée par l'usager, elle doit néanmoins induire une navigation prédictible, confortable, sécuritaire et satisfaire à ses préférences aussi subjectives soient-elles.

Afin d'être autonome, une plate-forme mobile doit en occurrence :

1. *percevoir* son environnement local à partir de mesures sensorielles de capteurs extéroceptifs ;
2. *interpréter* les mesures sensorielles pour définir son état courant en relation avec le ou les objectif(s) de la manoeuvre exécutée ;
3. *décider* de la stratégie qui répondra aux objectifs en respectant les contraintes ;
4. *exécuter* la stratégie choisie.

La perception peut être assurée par des capteurs de proximités (sonars, infrarouges ou télé-mètres laser) et par des caméras, tandis que l'exécution est supervisée par un contrôle moteur. Ce travail se concentre essentiellement sur l'interprétation de l'information sensorielle et sur la décision relative à la stratégie de navigation.

En environnements statiques², connus³ et contrôlés⁴, les positions des objets utiles à la manoeuvre (seuil pour un passage de porte, structure pour un stationnement, etc.) sont connues et n'ont donc pas besoin d'être évaluées à partir des données sensorielles. Les données sensorielles permettront surtout à la plate-forme de s'autolocaliser par la mise en correspondance des éléments perçus et connus. Puisque la position de la plate-forme et des objets liés à la manoeuvre est bien connue et que l'environnement est statique, la stratégie décisionnelle peut facilement être établie à priori et légèrement corrigée ensuite en fonction des erreurs de contrôle.

En environnements dynamiques⁵ et non contrôlés⁶, plusieurs difficultés importantes se présentent. La fonctionnalité d'autolocalisation peut être perturbée par la présence d'éléments incon-

¹L'intégration matérielle a été réalisée par d'autres membres de l'équipe de Polytechnique, notamment par Sousso Kelouwani, Hay Nguyen, Simon St-Pierre, Charles Gervais-Dumont et Patrick Mutchmore.

²Un environnement *statique* est inerte, n'évolue pas dans le temps, ne contient pas d'objet mobile.

³Un environnement *connu* par le système est représenté en sa mémoire.

⁴Un environnement *contrôlé* est adapté en fonction du système autonome.

⁵Un environnement *dynamique* évolue dans le temps, comporte des objets mobiles.

⁶Un environnement *non contrôlé* n'est pas adapté aux limites du système autonome.

nus dans l'environnement. Pour un environnement inconnu, les configurations des objets liés à la manoeuvre doivent être évaluées à partir des données sensorielles. Or, cette évaluation nécessite un travail de reconnaissance qui s'avère souvent délicat et d'autant plus lourd que les objets à identifier sont variés. Au niveau de la décision, la stratégie peut difficilement être établie en fonction d'un contexte précis puisque ce dernier est inconnu et sujet aux changements. Un effort de conception doit donc être investi afin d'élaborer des stratégies d'emblée efficaces pour la majorité des contextes.

Le problème s'intensifie encore lorsque l'environnement de navigation laisse peu de place à la plate-forme pour exécuter ses mouvements. Des conditions d'opérations très encombrées peuvent rapidement bloquer l'évolution des manoeuvres.

Comme il sera discuté dans la revue littéraire, les FRMSA actuels éprouvent des difficultés majeures à naviguer en environnement restreints. Aucun auteur n'a effectivement démontré jusqu'ici la capacité d'un FRMSA à traverser automatiquement une porte standard de manière fiable. Les difficultés des FRMSA à naviguer en de telles conditions sont étroitement liées à l'état de l'art de la robotique mobile. Des complications surviennent plus particulièrement au niveau de la génération du mouvement, la réaction aux obstacles, l'architecture de contrôle, l'élaboration de stratégies flexibles et l'autolocalisation.

Dans ce document, le problème de génération du mouvement réfère au *suivi de séquence de points de passage*, lequel correspond également au *suivi de trajectoires* lorsque les points sont infiniment rapprochés. On cherchera des mouvements fluides qui respectent les contraintes cinématiques et dynamiques de la plate-forme, le style de *conduite* désiré par l'utilisateur, la précision requise d'atteinte des destinations, les modes de déplacement requis (avant/arrière) et, parfois, la contrainte de temps. Dans l'approche de conception courante, la génération du mouvement vise d'abord à être stable sous des trajectoires lisses en situations peu contraintes. Des adaptations⁷ sont ensuite requises pour satisfaire les contraintes réelles. Pour des applications soumises à d'importantes contraintes, en particulier celle des FRMSA, ces adaptations s'avèrent ardues et conduisent ainsi à des solutions complexes à employer pour l'efficacité qui en résulte (Kim et Minor, 2007). Le comportement de navigation étant une conséquence subtile de la solution adoptée, il s'avère difficile à prédéterminer et à adapter en fonction des préférences des utilisateurs.

Dans les approches précédentes, la réaction aux obstacles est typiquement fonction de la configuration de l'environnement et d'expériences antérieures. Elles font abstraction d'un élément pourtant capital : les objectifs et la stratégie liés à la manoeuvre en cours d'exécution. Il en résulte un problème classique de compétitivité entre les mouvements nécessaires à la manoeuvre et ceux

⁷Une adaptation primaire consiste à limiter la commande et sa variation dans le temps pour respecter des vitesses et des accélérations maximales. Pour des contraintes plus subtiles (au niveau physique et du confort), des adaptations plus complexes sont aussi envisageables concernant la forme de la trajectoire à suivre (Kanayama et Hartman, 1997), (Kim et Minor, 2007).

généérés par la réaction aux obstacles.

Ayant bien identifié comment la plate-forme doit se déplacer et réagir aux obstacles, le principal défi consiste à concevoir des stratégies réalisant les fonctions de navigation et à coordonner l'ensemble des fonctionnalités dans une *architecture de contrôle*. Celle-ci doit faciliter l'élaboration de fonctionnalités évoluées en maximisant la réutilisation des développements et l'efficacité des traitements. Les architectures de contrôle proposées jusqu'ici rendent toutefois les fonctionnalités fortement couplées à la configuration matérielle et la réactivité (requis en environnement dynamique) concurrente à la délibération (définissant le plan d'exécution de la tâche).

Pour planifier des déplacements vers une destination dans l'environnement, la plate-forme doit être en mesure de connaître, en tout temps, sa pose (soit sa position et son orientation). Dans cette optique, la capacité d'autolocalisation est attrayante pour éviter d'avoir recours à des appareils de localisation externes. L'autolocalisation est typiquement réalisée en fusionnant une pose proprioceptive relative au mouvement, obtenue par un modèle dynamique, et une pose extéroceptive déduite par la mise en correspondance de l'information connue et perçue de l'environnement, dans un modèle d'observation. Dans cette fusion, l'importance relative des deux poses dépend de leur *précision*. Or, les modèles d'observation des approches précédentes s'avèrent très sensibles aux disparités entre l'environnement perçu et connu, puisqu'elles font abstraction de ces disparités tant au niveau de la mise en correspondance que de l'évaluation de la précision de la pose extéroceptive (en supposant qu'elle est seulement affectée par le bruit de mesure des capteurs extéroceptifs).

En bref, nous postulons que la robustesse de la navigation en environnements dynamiques et encombrés repose sur :

1. une localisation stable malgré la présence d'éléments inconnus dans l'environnement ;
2. des lois de commande s'adaptant aux limitations cinématiques et dynamiques de la plate-forme ainsi qu'aux fluctuations de la pose estimée ;
3. une réaction aux obstacles qui est cohérente aux objectifs de la tâche et qui garantit une navigation fluide exempte de collision ;
4. des stratégies efficaces en situations variées.

1.2 Objectifs de recherche

Ce travail vise premièrement à développer un système de navigation semi-autonome pour FRM permettant d'assister convenablement des personnes à mobilité réduite dans leurs déplacements quotidiens. L'appropriation du système par les usagers de FRM doit être simple et le système doit être en mesure d'opérer en lieux typiques d'utilisation des FRM, soit en environnements inconnus, dynamiques, encombrés et variés.

Étant donné les difficultés (discutées plus haut) liées à la navigation automatique d’une plate-forme mobile, la réalisation d’un tel système représente encore un défi majeur. Ce travail a donc également pour objectif de réviser les principes sous-jacents à la navigation automatique d’une plate-forme mobile, incluant :

- la génération du mouvement ;
- la réaction aux obstacles ;
- l’architecture de contrôle ;
- le développement de stratégies flexibles ;
- l’autolocalisation en environnement partiellement inconnu.

Les mouvements doivent être faciles à prévoir et à ajuster selon les préférences des usagers. La réaction aux obstacles doit être cohérente à la manoeuvre en cours d’exécution, garantir des vitesses sécuritaires malgré l’incertitude liée au contrôle dynamique, et contribuer à la manoeuvre. L’architecture de contrôle doit optimiser la réutilisation des fonctionnalités évoluées (sur une même plate-forme et d’une plate-forme à l’autre), du travail d’interprétation des mesures et du travail d’abstraction de l’information⁸. Elle doit également faciliter les développements et bien refléter les fonctionnalités qu’elle comporte. Afin de maximiser la réutilisation d’une stratégie évoluée, cette dernière doit convenir à la plupart des contextes liés à la fonctionnalité. L’autolocalisation doit enfin être robuste aux disparités entre l’environnement réel et celui représenté en mémoire.

1.3 Plan du mémoire

Le chapitre 2 présentera une revue sur l’application de FRMSA. Le suivi de points de passage à la base de la génération des mouvements est introduit au chapitre 3. Un *assistant stratégique* définissant la réaction aux obstacles est ensuite développé au chapitre 4. Le chapitre 5 présente l’architecture de contrôle de la plate-forme. Une manoeuvre évoluée de traversée de passage étroit est introduite au chapitre 6, suivie par une seconde manoeuvre évoluée de stationnement au chapitre 7. La méthode d’autolocalisation est enfin présentée au chapitre 8. Le chapitre 9 présente le SNSA proposé. Les expérimentations au chapitre 10 montreront les performances du FRMSA lors des tests d’évaluation effectués en collaboration avec des ergothérapeutes des Centres de réadaptation Lucie-Bruneau et Constance Lethbridge de Montréal.

⁸Comme nous le verrons au chapitre 5, l’*abstraction de l’information* consiste à extraire des caractéristiques hauts-niveaux à partir d’une information plus primaire. Ceci est couramment réalisé, par exemple, en identifiant les attributs des objets observés (formes, couleurs, types, groupe d’appartenance, etc.).

CHAPITRE 2

REVUE LITTÉRAIRE

Pour élaborer un fauteuil roulant semi-autonome (FRMSA) attrayant, la première étape consiste à déterminer quelles personnes en bénéficieraient, leurs besoins et leurs attentes (Fioretti *et al.*, 2000), (Cortésa *et al.*, 2003), (Simpson *et al.*, 2008). Ayant identifié des fonctionnalités d'assistance conséquentes, une interface doit permettre, en tout temps, de reconnaître la tâche désirée, laquelle doit finalement être exécutée de manière convenable. L'identification des fonctionnalités, de l'interaction personne-machine, des stratégies de contrôle et des caractéristiques matérielles du fauteuil apparaissent comme étant les principaux enjeux sur lesquels se sont concentrées les nombreuses recherches recensées depuis les années 1980 en rapport avec l'application de FRMSA.

Un aperçu de systèmes récents est présenté au tableau 2.1. Les caractéristiques dominantes de chaque système cité sont indiquées par un «x» et le symbole «x+» indique qu'une attention spéciale a été investie (conduisant à une solution originale)¹. Seules les caractéristiques partagées par au moins deux systèmes sont présentées dans le tableau. Les caractéristiques de notre système, ajoutées à titre comparatif, seront discutées plus en détail au chapitre 9.

2.1 La clientèle potentielle des FRMSA

Selon une étude de Simpson *et al.* (2008), le nombre d'utilisateurs pouvant bénéficier d'un FRMSA se situerait entre 2.6 millions et 3.9 millions en 2010, ce qui représente de 61% à 91% des utilisateurs de FRM. Ce fort taux suppose toutefois un niveau d'assistance varié s'accommodant à diverses conditions physiques, perceptuelles et cognitives des usagers. L'aptitude manuelle à piloter un FRM peut être perturbée par un manque de coordination (ataxie), de rapidité et d'ampleur du mouvement (bradykinésie), par un mauvais contrôle musculaire (dystonie) et par une faiblesse musculaire. L'aptitude perceptuelle est réduite par des troubles de pivotement de la tête, de mouvement des yeux, de basse vision ou de faibles champs de vision. L'aptitude cognitive est couramment affectée par une détérioration neurologique, laquelle peut provoquer chez l'utilisateur un manque d'attention, des agitations, un comportement agressif et violent causant en somme une conduite dangereuse. En raison de problèmes de raisonnement, l'utilisateur pourrait également ne pas savoir comment atteindre sa destination. Parmi les conditions les plus critiques, Simpson *et al.* (2008) souligne celles imposées par des accidents à la moelle épinière, des accidents vasculaires cérébraux, des scléroses en plaques, des scléroses latérales amyotrophiques, la paralysie cérébrale, la

¹Remarquez que certaines caractéristiques ont pu être ajoutées depuis sur ces systèmes.

Tableau 2.1 Aperçu des caractéristiques de FRMSA récents.

| | Fonctionnalités | | | | | | | | | | Inter. homme-machine | | | | | | Matérielles | | | | | | | | | | | |
|---|------------------------|---------------------------|-------------------|--------------------|------------------------------|------------------------|----------------|-----------------------|--------------------------|----------------|----------------------|------------------|-------------------|---------------------|----------------------------|-------------------------|----------------------------|----------------|--------------|---------------|-----------------------|-------------------------|------------------|------------|--------|-------------|-------------------|---------|
| | Locale | | | | | Globale | | | | | Action | | Commande | | | | FRM | | | Perception | | | | | | | | |
| | Evitement de collision | Contournement d'obstacles | Passage de portes | Suivre un corridor | Alignement - objets latéraux | Suivre un objet mobile | Marche arrière | Suivi de trajectoires | Atteinte de destinations | Suivi de route | Localisation externe | Autolocalisation | Tâche automatique | Réponse automatique | Interface graphique/ écran | Avec une main (manette) | Tactile (écran ou boutons) | Vocale (micro) | Avec la tête | Avec les yeux | Commercial / standard | Non commercial standard | Omnidirectionnel | Pare-chocs | Sonars | Infrarouges | Télémetres lasers | Caméras |
| VAHM (Bourhis et Agostini, 1998) | x | x | | | x | | | | x | x | | x | x+ | | x | | | | | | x | | | | x | | | |
| OMNI (Borgolte et al., 1998) | x | | x | x | | | x | x | | | | | x | x | x | x | | | | | | | x+ | x | x | x | | |
| NavChair (Simpson et Levine, 1997-1999) | x | x | x+ | | x+ | | | x | | | | | x+ | x+ | x | x | | x | | | x | | | | x | | | |
| Wheelesley (Yanco, 1998) | x | x | | | | | | | | | | | | | x+ | x | x | | | x+ | | | | x | x | | | |
| MAID (Prassler et al., 1998-1999) | x | x+ | x | x | x | | | x | x | | | x | x | x | x | | | | | | x | | | | x | x | x | |
| Bremen (Rofer et Lankenau, 2000) | x+ | | x | | | | | | | x | x | | | | | x | | | | | x | | | | x | | | |
| (Seki et al., 2000) | | | | | | | | x | x | | x+ | | x | x | x | | | | | | x | | | | x | | | |
| (Fioretti et al., 2000) | x | x+ | | | | | | x | | | | | x+ | x+ | x | x | | | | | x | | | | x | | | |
| SIAMO (Mazo et al., 2000) | x | x | x | x | | x | | x+ | | | | | x+ | | x | x | x | x+ | x | | | x | | x | x | x | | |
| (Kitagawa et al. 2001) | x | | | | | | | | | | | | | | | | x+ | | | | | | x+ | | x | x | | |
| SmartChair (Rao et al., 2002) | x | x | x | x | x | | x | | | | | | x | | x+ | x | | | | | | | | | | | x | |
| (Sgouros, 2002) | x | x | x | | | | | | | x | x+ | x+ | | | x | | | x | | | x | | | | x | | | |
| (Argyros et al., 2002) | x | | | x+ | | x+ | | | | | | | | x | x | x | | x | | | x | | | | x | | | x |
| Roland III (Mandel et al., 2005) | x | x | x | | | | | | x+ | x | | x | x | | x | x | | x+ | | | x | | | | | | x | x |
| (Rebsamen et al., 2007) | x | x | | | | | | | x | | x | | | | x | | | | | | x | | | | | x | | |
| (Trieu et al., 2008) | x | x+ | | | | | | | | | | | x+ | | | | | | x | | | | | | | | x | |
| (Bonci et al., 2009) | x | x | | | | | | x | x+ | | | x | x | | | | | | | | x | | | | x | | | |
| (Montesano et al., 2010) | x | x+ | | | | | | | x | x | | | | | x+ | | x | | | | x | | | | | | | |
| Prototype proposée | x+ | x | x+ | x | x | x | | x+ | x | | | x+ | x | x | x | x | | x+ | | | x | | | | | | x | |

maladie de Parkinson et d'Alzheimer.

2.2 Interaction personne-machine

L'efficacité de l'interaction personne-machine est cruciale pour que les fonctionnalités soient exploitées convenablement de manière à satisfaire aux attentes des usagers. Les fonctionnalités relatives à chaque système de navigation semi-autonome et la manière de les employer varient notablement d'un système à l'autre. Chaque système du tableau 2.1 a effectivement développé des modes d'opérations et des moyens d'interaction personne-machine assez variés. Cet effort constant à toujours proposer des systèmes plus conviviaux s'explique en grande partie par les difficultés d'*appropriation*² du système, qui nécessite un rapport personne-machine adapté (Goodrich *et al.*, 2001), (Parasuraman *et al.*, 2000). Parmi ces difficultés, nous soulignons plus particulièrement :

1. la difficulté à comprendre comment utiliser le système ;
2. la difficulté à prévoir ses comportements, ses réactions à l'environnement ;
3. l'incohérence entre les actions désirées et exécutées (comprend l'impossibilité d'obtenir les actions et les comportements désirés).

²La facilité d'*appropriation* d'un produit par l'utilisateur est reconnue en marketing comme un élément clé à son succès. Brunel *et al.* (2009) stipule que : « [...] l'appropriation se manifeste comme l'exercice d'un contrôle, d'un pouvoir physique et/ou mental sur l'objet (Prohansky *et al.*, 1970). [...] en marketing (Chaney *et al.*, 2007), l'objet approprié est défini comme un support d'expression de soi Belk (1988).

2.2.1 Compréhension de l'utilisation

Le problème de compréhension de l'utilisation se situe au niveau de la communication personne-machine et des fonctionnalités d'assistance fournies. Des interfaces doivent décrire clairement les fonctionnalités du système afin que l'utilisateur comprenne rapidement comment les exploiter. L'utilisateur doit également être en mesure de comprendre, en tout temps, les actions et les décisions du système de navigation semi-autonome. Des interfaces graphiques sont couramment employées dans cette optique. Par exemple, l'interface de Montesano *et al.* (2010) représente en trois dimensions l'environnement de navigation local de l'utilisateur. Ce dernier, visualisant la correspondance entre son environnement local et celui représenté, peut alors pointer sur l'écran tactile une destination à atteindre.

Les interfaces de commande doivent être adaptées aux limitations physiques, cognitives et perceptuelles de l'utilisateur. L'interface de commande la plus utilisée est apparemment la manette, qui permet de contrôler directement le système ou de sélectionner des tâches évoluées sur une interface graphique. D'autres outils ont également été développées pour naviguer sur une interface graphique, exploitant des commandes tactiles, avec la tête, avec les yeux, avec expulsion d'air (Mazo *et al.*, 2000) et même directement avec le cerveau (Rebsamen *et al.*, 2007).

Le problème de compréhension de l'utilisation du système se situe aussi au niveau du choix de la commande qui engendre la réalisation d'un objectif précis. La commande peut être sélectionnée de manière discrète (un choix parmi un ensemble de possibilités) ou continue (un choix parmi une quasi-infinité de possibilités). Le type de sélection (discrète ou continue) est directement lié à l'interface de contrôle utilisée. Par exemple, l'interface vocale et le clavier permettent une sélection discrète alors que la manette et l'écran tactile permettent une sélection continue. L'inconvénient de la sélection discrète est qu'elle peut induire une quantité phénoménale de commandes (reflétant la variabilité des objectifs des usagers) ou limiter les options à un nombre restreint. Que ce soit en raison d'un nombre appréciable ou restreint de commandes, il peut s'avérer difficile pour l'utilisateur de savoir quoi commander pour atteindre ses objectifs. Quant à la sélection continue, elle se limite aux objectifs continus tels qu'atteindre une destination dans l'environnement ou naviguer selon certaines vitesses de déplacement.

2.2.2 Prévisibilité des comportements

La difficulté à prévoir les comportements du système provient typiquement d'une inconsistance entre la conduite automatique de la plate-forme et celle qui serait envisagée par l'utilisateur s'il était en moyen. Elle provient également d'une navigation différente de celle normalement observée avec des fauteuils roulants motorisés conventionnels (surtout pour les nouveaux utilisateurs) et d'une grande variabilité des comportements observés du système. Ce problème est surtout imputable au

type d'assistance effectué par le système autonome (Parasuraman *et al.*, 2000), à son architecture de contrôle et aux méthodes de contrôle employées dans chacune des fonctionnalités. La difficulté à prévoir les comportements du système provoquerait un manque de confiance chez l'utilisateur.

2.2.3 Cohérence de l'exécution

L'incohérence entre les actions désirées et exécutées est d'abord liée au problème de compréhension et de prédiction. D'une part, une mauvaise compréhension de l'utilisation du système peut induire une mauvaise exploitation de ses fonctionnalités, générant ainsi des actions inappropriées. D'autre part, le manque de prédictibilité du système implique qu'il effectue couramment des actions variées, donc contredisant la volonté de l'utilisateur dans la mesure où ce dernier désire une action précise. Par ailleurs, les fonctionnalités du système autonome étant limitées, les tâches désirées par l'utilisateur pourraient ne pas être offertes telles qu'attendues.

L'incohérence entre ce qui est désiré et exécuté est assez grave, car elle signifie que l'utilisateur ne parvient pas à s'approprier le système de manière à satisfaire ses besoins. Elle générera en conséquence des sentiments de frustration chez l'utilisateur.

2.2.4 Rôle de l'utilisateur et du SNSA

Pour avoir un système s'adaptant à la variabilité des conditions et des préférences des utilisateurs, plusieurs niveaux d'assistance sont requis et plusieurs interfaces de commande sont envisageables. La majorité des systèmes développés comportent jusqu'à trois niveaux d'autonomie, exigeant une participation décroissante de l'utilisateur :

- niveau d'assistance d'une commande continue de l'utilisateur ;
- niveau de manoeuvres discrètes ;
- niveau d'atteinte de destinations dans l'environnement.

En général, les choix des niveaux, des tâches et des déplacements sont effectués délibérément par l'utilisateur. Le système autonome effectue ainsi une assistance *explicite*. Au premier niveau, l'utilisateur applique une commande continue comme il le ferait avec un FRM conventionnel. Toutefois, sa commande est inhibée au besoin pour éviter que la plate-forme n'entre en collision avec les obstacles³. Au deuxième niveau, l'utilisateur commande des manoeuvres discrètes appropriées au contexte local, tel qu'un suivi de mur le long d'un couloir, un avancement en ligne droite dans un gymnase, un passage de porte à une intersection, etc. Au dernier niveau, l'utilisateur commande l'atteinte automatique d'une destination. En général, on cherchera une contribution maximale, mais confortable, de l'utilisateur afin qu'il maintienne ses habiletés. Le dernier niveau sera ainsi surtout utile pour des

³L'inhibition des vitesses commandées constitue une assistance *implicite* de base. Lorsque nous parlerons d'assistance *implicite*, nous ferons plutôt référence au cas où la direction du mouvement commandée par l'utilisateur est adaptée (en plus de l'amplitude des vitesses).

usagers en condition plus critique comme ceux atteints de paralysie cérébrale (Montesano *et al.*, 2010).

Dans l'objectif de réduire l'effort des usagers, on préférera parfois que le système réalise une assistance *implicite* en choisissant automatiquement ses modes d'opération et/ou ses déplacements à l'aide d'une commande de base de l'utilisateur (Levine *et al.*, 1999), (Prassler *et al.*, 1999), (Argyros *et al.*, 2002), (Trieu *et al.*, 2008) et (Urdiales *et al.*, 2008). Pour des fonctions évoluées, l'assistance implicite risque, en contrepartie, d'induire des complications au niveau de la compréhension, de la prédictibilité et de la cohérence du système (Parasuraman *et al.*, 2000), (Urdiales *et al.*, 2008), soient les principaux facteurs d'insatisfaction énumérés plus haut. En effet, puisque les actions effectuées par le système, pour une même commande de l'utilisateur, varieront selon le contexte environnant et selon des facteurs indécélables (comme l'évaluation de son *aptitude* au pilotage relativement à celle d'un module autonome), l'utilisateur pourrait avoir de la difficulté à prévoir l'effet de sa commande et à savoir quoi commander pour qu'une action précise soit exécutée. En cachant l'effet de la commande du pilote, l'assistance implicite peut également conduire à une dégradation de ses habiletés et faire en sorte qu'il se sente désengagé du contrôle (Parasuraman *et al.*, 2000).

2.3 Identification des fonctionnalités

Les fonctionnalités présentées dans le tableau 2.1 sont classées selon qu'elles réfèrent à une navigation *locale* ou *globale*. Les fonctionnalités *locales* opèrent en fonction du contexte réel environnant la plate-forme. Les fonctionnalités *globales* utilisent un raisonnement spatial nécessitant l'évaluation de la configuration de la plate-forme dans l'espace de travail en vue de la conduire à des destinations.

2.3.1 Fonctionnalités de navigation locale

L'évitement de collision est une fonctionnalité omniprésente sans laquelle la navigation ne serait pas sécuritaire. Elle implique simplement que la plate-forme limite ses vitesses d'approche des obstacles. Cette fonctionnalité est assurée directement à partir des mesures des capteurs extéroceptifs ou par l'intermédiaire d'une carte d'occupation dynamique⁴ de l'environnement local (Rofer et Lankenau, 2000), (Kitagawa *et al.*, 2001), (Sgouros, 2002). Les techniques utilisant directement les lectures des capteurs sont souvent préférées pour leur *réactivité* offerte par la rapidité des traitements et pour la simplicité de leur implémentation. Typiquement, les vitesses de la plate-forme seront inhibées lorsque la distance entre la plate-forme et les obstacles en *direction du mouve-*

⁴Une carte d'occupation *dynamique* évolue en temps réel en fonction des objets détectés dans l'environnement, par opposition à une carte *statique*.

ment est inférieure à un seuil, considérant que le mouvement de chacun des points du périmètre de la plate-forme (et des capteurs) correspond au mouvement du point de giration⁵. Or, cette assumption est d'autant moins réaliste que la vitesse angulaire est grande et que les obstacles sont approchés. En environnement restreint, cette assumption devient très déficiente : des mouvements causant des collisions peuvent être permis et des mouvements sans danger de collision inhibés, bloquant la plate-forme inutilement. En conséquence, la plupart des systèmes faisant abstraction de la trajectoire réelle du périmètre de la plate-forme éprouvent de sérieuses difficultés à opérer en environnement restreint. Pour faciliter cette prise en considération, une carte d'occupation dynamique peut être employée. Par exemple, Rofer et Lankenau (2000) effectuent des simulations de mouvements sur une carte où des *capteurs virtuels* permettent d'évaluer les risques de collisions. Pour le système de Montesano *et al.* (2010), la technique de Minguez *et al.* (2006) évalue l'ensemble des trajectoires admissibles de la plate-forme pour chaque point d'occupation en considérant son périmètre. Ces deux dernières approches s'avèrent toutefois plus coûteuses en temps de traitement, donc plus critiques pour la réactivité du système.

Le contournement d'obstacle est une fonction inhérente au type de navigation effectué. Il peut d'abord résulter d'une navigation locale visant à diriger le robot vers des zones dégagées d'obstacle (Yanco, 1998), (Simpson et Levine, 1997), (Fioretti *et al.*, 2000), (Sgouros, 2002) et (Bonci *et al.*, 2005). Dans cette perspective, la collaboration de l'utilisateur est requise de manière continue (premier niveau d'autonomie) ou discrète (deuxième niveau d'autonomie). Au premier niveau d'autonomie, une assistance implicite module la direction de l'utilisateur de manière à conduire la plate-forme en une zone exempte d'obstacle (Simpson et Levine, 1997), (Fioretti *et al.*, 2000) et (Bonci *et al.*, 2005). Au deuxième niveau d'autonomie, l'utilisateur est interrogé ponctuellement lorsqu'un obstacle empêche la progression de la manoeuvre afin qu'il choisissent l'action appropriée (Bourhis et Agostini, 1998), (Rebsamen *et al.*, 2007), (Bonci *et al.*, 2005). Pour NavChair (Simpson et Levine, 1997), l'évitement d'obstacle local est même un mode de navigation employé par défaut (*General Obstacle Avoidance mode*).

Pour la navigation globale au troisième niveau d'autonomie, le contournement d'obstacle est effectué implicitement en planifiant la trajectoire en fonction des obstacles perçus, via une recherche de mouvements sécuritaires (Prassler *et al.*, 1999), par l'approche de fenêtre dynamique (Mandel *et al.*, 2005) de Fox *et al.* (1997), par une déformation élastique (Rebsamen *et al.*, 2007) expliquée par Zeng *et al.* (2006), par un réseau de neurones original (Trieu *et al.*, 2008), par une planification dans l'espace de configuration (Bonci *et al.*, 2005) de Latombe *et al.* (1991) ou autres (Montesano *et al.*, 2010).

La fonctionnalité de suivi de trajectoire (ou d'une séquence de points) est nécessaire lorsque la

⁵Cette assumption est implicite pour les méthodes où la plate-forme est considérée comme étant un point (Sgouros, 2002), dans un environnement où les obstacles sont conceptuellement grossis d'une dimension correspondant à sa demi-largeur.

plate-forme doit atteindre une succession de positions dans l'environnement. Des méthodes classiques de suivi de trajectoires sont normalement employées pour réaliser cette fonctionnalité. Toutefois, ces dernières rendent difficile l'obtention d'une navigation *naturelle* (semblable à celle effectuée par des usagers normaux) et *confortable*. Pour minimiser ces inconvénients, Mazo *et al.* (2000) et Gulati et Kuipers (2008) proposent des variantes afin d'augmenter le confort.

Le passage de portes est sans contredit l'une des fonctionnalités évoluées des plus utiles, mais difficile à réaliser (les principaux enjeux liés à cette fonctionnalité sont décrits au chapitre 6.). Parmi les FRMSA cités dans le tableau, aucun ne démontre la capacité à traverser automatiquement et avec fiabilité une porte de largeur conventionnelle (moins de 90 cm). Les seules expériences (Levine *et al.*, 1999) qui démontrent cette habileté supposent que l'utilisateur contribue à la manoeuvre à l'aide d'une manette.

Certaines fonctionnalités sont propres à des systèmes particuliers, tel qu'entrer dans un monte-charge (Mazo *et al.*, 2000) et inverser la dernière manoeuvre (Borgolte *et al.*, 1998). Aucun ne possède la fonctionnalité de stationnement automatique ou de transfert latéral en environnement encombré. Cette fonctionnalité est pourtant difficile à réaliser pour l'utilisateur et essentielle pour ranger le fauteuil le long d'un mur ou près d'un lit avant que l'utilisateur s'y installe.

2.3.2 Fonctionnalités de navigation globale

La navigation globale nécessite l'évaluation de la pose de la plate-forme et l'élaboration d'une stratégie la conduisant à ses destinations.

En premier lieu, la pose de la plate-forme peut être évaluée en intégrant ses vitesses de déplacement à partir d'une pose initiale connue. Cette méthode est toutefois très sensible aux glissements et est, en pratique, inutilisable en contexte réel. Pour une meilleure robustesse, la plate-forme peut : s'autolocaliser en fusionnant ses vitesses de déplacements à des mesures de l'environnement (ce qui exige que l'environnement soit connu) ou avoir recourt à des dispositifs de localisation externes (ce qui suppose que l'environnement possède les dispositifs nécessaires et/ou permet la propagation de l'information entre la plate-forme et les dispositifs externes).

Pour atteindre la destination, une trajectoire est typiquement planifiée dans l'environnement et mise à jour par la suite afin de contourner les obstacles détectés. Plutôt que d'utiliser une technique de suivi de trajectoire, on préfère parfois exécuter un suivi de route plus général en employant des fonctions adaptées au contexte précis le long de la route, telles qu'une méthode de suivi de mur le long d'un couloir, de passage de porte lors d'une intersection, etc.

2.4 Caractéristiques matérielles

La plupart des systèmes autonomes reposent à la base sur un FRM commercial sur lequel est ajouté l'équipement nécessaire à ses fonctionnalités de navigation semi-autonome, comprenant des capteurs extéroceptifs pour la perception de l'environnement, des capteurs proprioceptifs pour déterminer l'état de la plate-forme (vitesses de déplacement, inclinaison) et des dispositifs de contrôle pour sa locomotion. Certains auteurs ont également testé leur système de navigation semi-autonome sur des fauteuils non commerciaux (Yanco, 1998), (Mazo *et al.*, 2000) et d'autres ont élaboré des fauteuils omnidirectionnels facilitant le contrôle en environnements restreints (Borgolte *et al.*, 1998) et (Kitagawa *et al.*, 2001). Pour réduire les conséquences des collisions, des parechocs sont parfois employés (Borgolte *et al.*, 1998), (Mazo *et al.*, 2000).

Les capteurs extéroceptifs employés sont généralement des capteurs de proximité, en majorité des sonars. L'utilisation abondante des sonars s'explique par leur faible coût et par leur champ de vision assez large qui facilite la détection des obstacles. Pour évaluer une position précise des obstacles détectés, l'infrarouge s'avère préférable au sonar vu son champ de vision étroit limité à un trait. Lorsque le budget est moins contraignant, on préférera utiliser des télémètres lasers, qui permettent de déterminer précisément la configuration 2D de l'environnement local. Mis à part les capteurs de proximité, les caméras s'avèrent une alternative intéressante en raison de la richesse de l'information qu'elles procurent et de leur faible coût. Par exemple, une caméra panoramique est employée par Argyros *et al.* (2002) pour réaliser le suivi d'une personne par ses caractéristiques visuelles (couleurs), une fonction qui aurait été plus difficile à réaliser avec des capteurs de proximité. Les capteurs proprioceptifs comprennent généralement des encodeurs au niveau des roues permettant l'évaluation des vitesses de déplacement de la plate-forme, ce qui est pratique pour suivre l'évolution de sa pose et au niveau du contrôle.

2.5 Conclusion

Ce chapitre a présenté l'intérêt, les principaux enjeux et les caractéristiques des SNSA pour FRM. Nous avons expliqué que la majorité des utilisateurs de FRM pourrait bénéficier d'un tel système à condition qu'il puisse s'adapter à leurs conditions et à leurs besoins respectifs. Pour que l'assistance du système de navigation semi-autonome soit pertinente et appréciée, les usagers doivent être en mesure de comprendre comment l'utiliser et de prévoir ses comportements. Cette assistance doit aussi être cohérente à la volonté des usagers. De manière générale, les systèmes précédents éprouvent tous des difficultés majeures à naviguer en lieux dynamiques, restreints et variés, soient des lieux typiques des déplacements quotidiens des usagers.

CHAPITRE 3

GÉNÉRATION DU MOUVEMENT : SUIVI D'UNE SÉQUENCE DE POINTS DE PASSAGE

3.1 Introduction

En robotique mobile, le problème de suivi d'une séquence de points de passage vise à générer le mouvement qui mènera la plate-forme à traverser efficacement chaque point consécutif. Dans cette perspective, ce chapitre élabore lois de contrôle satisfaisant les limitations cinématiques et dynamiques du système, la précision d'atteinte des points de passage, les contraintes temporelles et, si possible, le profil de conduite désiré par l'utilisateur.

La séquence de points de passage est souvent obtenue par planification de chemins discrets dans un graphe de connectivité (LaValle, 2006), mais peut également être générée à l'aide de techniques d'exploration réactive (Wang *et al.*, 2008).

De manière classique, le suivi d'une séquence de points nécessite un deuxième niveau de planification visant l'obtention d'un chemin continu, ensuite utilisé par un contrôleur de suivi de chemin (*path-follower*). La forme des chemins reliant les points doit être lisse en vue de produire des mouvements qui satisfont aux contraintes cinématiques et dynamiques du système. Ces chemins sont ainsi construits à l'aide de lignes et de segments d'arc (Dubins, 1957), de courbes polynomiales (Nelson, 1989), de clothoïdes (Fleury *et al.*, 1995), de courbes de Bézier (Arakawa *et al.*, 1995), de B-Splines (Munoz *et al.*, 1994) ou de cubiques spirales (Kanayama et Hartman, 1997). Les contrôleurs de suivi de chemins *continus* travaillent habituellement avec une vitesse linéaire constante (Chwa, 2004/07/), (Huang et Tsai, 2009), (Normey-Rico *et al.*, 2001), (Egerstedt *et al.*, 2001), (Raffo *et al.*, 2009), (Scaglia *et al.*, 2009), bien qu'elle puisse parfois varier selon le rayon de courbure du chemin (Gulati et Kuipers, 2008), (Munoz *et al.*, 1994), (Macek *et al.*, 2005). La vitesse angulaire est obtenue par une loi de contrôle en boucle fermée visant à réduire l'erreur d'orientation, par exemple, à l'aide d'un contrôleur proportionnel-intégral-dérivé (PID) (Normey-Rico *et al.*, 2001), d'un contrôleur robuste (Scaglia *et al.*, 2009), (Park *et al.*, 2009), d'un contrôleur par mode de glissement (Chwa, 2004/07/) ou autres (Egerstedt *et al.*, 2001), (Huang et Tsai, 2009), (Raffo *et al.*, 2009). Toutefois, l'utilisation d'une vitesse linéaire constante nécessite qu'elle soit fixée à de faibles valeurs, sans quoi d'importantes accélérations centripètes pourraient être induites lorsque le rayon de courbure est faible. En parallèle, les lois de contrôle utilisées pour la vitesse angulaire ne prennent pas implicitement en considération les contraintes cinématiques. Ces contraintes ne font que borner à posteriori la commande angulaire et peuvent ainsi introduire de l'instabilité dans

le contrôle (Kim et Minor, 2007) Or, cette façon de générer la commande angulaire rend difficile l'obtention d'un comportement de conduite précis, stable et prévisible. L'utilisation d'un contrôleur de suivi de chemin classique, opérant sur un chemin continu facultatif¹, n'est pas optimale, d'une part, à cause du manque d'anticipation et, d'autre part, du fait que ce chemin est statique.

Le manque d'anticipation est dû au fait que les vitesses de référence varient en fonction des erreurs de configuration courantes et précédentes, et non en fonction des configurations futures. Cette absence de prise en considération des états futurs dans les lois de contrôle s'explique bien du fait qu'elles sont empruntées des théories de compensation classiques où la commande est toujours adaptée en fonction des expériences antérieures. Pourtant, cette absence d'adaptation des vitesses de référence aux contextes futurs peut exiger des mouvements brusques ou inaptes à assurer le suivi du chemin². Pour une meilleure anticipation, la théorie de la commande optimale (Bryson et Ho, 1975) permet la planification du mouvement de la cible jusqu'à la plate-forme, par *rétro-propagation*, en minimisant une fonction de coût visant par exemple à réduire les accélérations et les vitesses de déplacement. Toutefois, le comportement résultant d'une configuration des poids accordés aux critères est difficile à prédire, conduisant également à une stabilité et à une sécurité plus difficile à garantir. De plus, la théorie de la commande optimale ne règle pas simultanément le problème de planification de la trajectoire et de planification du mouvement (la trajectoire ou les vitesses doivent être fixées à priori). Nonobstant l'utilisation de la théorie de la commande optimale, le principe de rétropropagation sera employé dans notre approche pour la détermination d'une vitesse cible sur chaque point de passage.

D'autre part, la compensation d'erreurs sur un chemin statique n'est pas idéale dans la mesure où le chemin le plus approprié (par sa forme et sa longueur) vers la cible change selon la pose courante de la plate-forme. Ainsi, dans (Arakawa *et al.*, 1995), il est proposé d'actualiser continuellement la trajectoire de référence à partir de la pose courante. Nous montrerons que cette actualisation du chemin peut être évitée en intégrant directement à la loi de commande les critères cinématiques employés dans la construction du chemin.

Ce chapitre introduit une approche qui réalise le suivi d'une séquence de points en respectant le comportement de conduite désiré, la précision requise sur le passage des points et les modes de déplacement (avant/arrière) spécifiés. Cette approche se base sur une loi de commande anticipative qui est fonction de l'état courant (position et vitesses) de la plate-forme relativement aux contextes futurs. Aucun chemin continu n'est requis entre les points de passage, l'allure du chemin effectif étant une conséquence du profil de conduite assigné. Une méthode de compensation des délais

¹Le chemin continu est *facultatif* au sens que sa forme n'est pas contrainte. La contrainte se limite à traverser efficacement les points de passage avec la précision désirée.

²Ceci est le cas, par exemple, pour une automobile qui ne ralentit pas à l'approche d'une courbe devenant subitement très prononcée. Soulignons que l'importance de l'anticipation est bien connue pour la conduite d'une automobile (SAAQ, 2006), où le chauffeur doit toujours regarder, non pas au côté de l'automobile à la position où elle devrait se trouver à l'instant courant, mais dans la direction où elle doit se rendre.

et des pôles assure un contrôle efficace même en présence d'une réponse dynamique lente de la plate-forme. Une adaptation automatique des paramètres de conduite permet enfin l'atteinte de contraintes temporelles.

Le chapitre est subdivisé comme suit. L'exposé du problème est présenté à la section 3.2 et la définition du profil de conduite à la section 3.3. La méthode de suivi de séquence de points de passage est détaillée à la section 3.4, suivie d'une analyse de la convergence à la section 3.5, de l'atteinte de contraintes de temps à la section 3.6 et de la technique de compensation des limitations dynamiques à la section 3.7. Les résultats expérimentaux sont finalement présentés à la section 3.8.

3.2 Exposé du problème

La séquence de points de passage regroupe N points w_i . Chaque point a des coordonnées $\{x_i, y_i\}$ et doit être traversé à une distance maximale de r_i . Le *chemin effectif*, tel que représenté à la figure 3.1, est celui réellement parcouru par la plate-forme. Bien que sa forme ne soit pas contrainte, elle doit correspondre à une navigation efficace respectant un profil de conduite assigné.

L'objectif est d'obtenir une méthode de suivi de points de passage produisant un comportement de navigation efficace, prévisible et permettant que chaque point soit traversé avec la précision et le mode de déplacement (avant ou arrière) désiré. Cette méthode doit également être apte à opérer sur des systèmes dont la réponse dynamique comporte des délais et des pôles du premier ordre et des contraintes de temps doivent pouvoir être respectées.

3.3 Définition du profil de conduite

Le profil de conduite comprend un ensemble de paramètres caractérisant les mouvements admissibles, souvent issus d'un besoin de sécurité, de précision et de fluidité des déplacements. Ces paramètres de conduite, présentés à la table 3.1, sont définis strictement positifs.

Pour des raisons de sécurité, de contraintes mécaniques, d'économie d'énergie et pour les objectifs spécifiques de l'application, des limites de vitesses et d'accélérations sont normalement

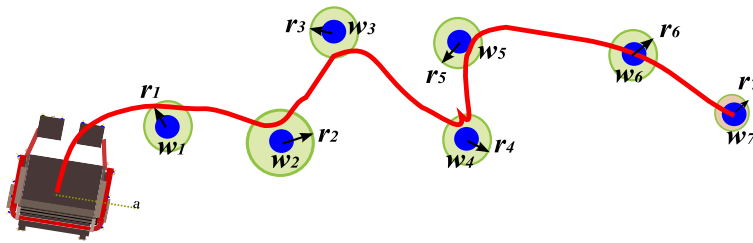


Figure 3.1 Un exemple de chemin effectif (en trait continu) associé à une séquence donnée de points de passage.

Tableau 3.1 Paramètres du profil de conduite.

| | | |
|-----------------------------|-------------------|--|
| v_{av}, v_{ar} | m/s | Vitesse linéaire maximale en mode de déplacement avant et arrière |
| ω_{max} | rad/s | Vitesse angulaire maximale. |
| a_{max}, α_{max} | $m/s^2 - rad/s^2$ | Accélération linéaire et angulaire maximale. |
| a_s, α_s | $m/s^2 - rad/s^2$ | Décélération linéaire/angularaire maximale vers une cible. |
| λ | - | Exposant de décroissance de la vitesse linéaire selon l'écart d'orientation angulaire. |
| β | $1/rad$ | Coefficient de décroissance de la vitesse linéaire selon l'écart d'orientation angulaire. |
| r_i $i = 1, \dots, N.$ | m | Précision (ou rayon) d'un point de passage i . |
| m_i $i = 1, \dots, N$ | - | Mode de déplacement i (avant ou arrière) |

imposées. La vitesse angulaire maximale est ω_{max} et la vitesse linéaire maximale, v_{max} , dépend du mode de déplacement :

$$v_{max}(m_i) = \begin{cases} v_{av} & m_i = 1 \\ v_{ar} & m_i = -1 \end{cases},$$

où m_i ajuste le mode de déplacement vers le point w_i : une valeur de 1 implique un mode de déplacement avant et -1 un mode de déplacement arrière. Nous supposons que le mode de déplacement varie seulement lors d'un changement de cible. Ainsi, un mode de déplacement spécifique m_i est associé à chaque point w_i . Les accélérations linéaires et angulaires maximales sont définies par a_{max} et α_{max} . La décélération maximale vers une cible est de a_s en linéaire et de α_s en angulaire.

La commande temps-réel de la vitesse linéaire doit favoriser le rapprochement de la plate-forme vers le prochain point de passage. Or, ceci peut être simplement obtenu si la vitesse linéaire diminue en fonction de l'écart angulaire, comme on l'observe pour la conduite humaine telle qu'avec une automobile. Les paramètres de décroissance de la vitesse linéaire β et λ définissent à quel point la vitesse linéaire sera réduite par l'écart angulaire, comme il sera expliqué à la section 3.4. La précision du chemin est définie par les rayons r_i des points de passage w_i introduits à la section 3.2 (la notation r est employée si tous les points ont le même rayon).

3.4 Méthode proposée de suivi de points de passage

Cette section présente les lois de vitesse angulaire et linéaire, l'estimation des vitesses requises sur les points de passage et la condition de changement de cible.

3.4.1 Évaluation de la vitesse angulaire

L'objectif est de définir une loi de commande qui minimise le temps de compensation de l'écart angulaire, tout en respectant les limites de vitesse ω_{max} et de décélération α_s . Afin de prévenir un dépassement, la vitesse angulaire doit être nulle si l'écart angulaire est nul. Pour demeurer appropriée malgré une évolution erratique de la pose de plate-forme (due aux glissements, propriétés dynamiques, etc.), la loi ne doit pas varier en fonction du temps, mais de l'écart angulaire. Il est démontré à l'annexe A.1 que la loi de la vitesse angulaire qui respecte l'ensemble des contraintes est la suivante :

$$\omega_k^*(\phi_k) = \begin{cases} \sqrt{2|\phi_k|\alpha_s} \cdot \text{sign}(\phi_k) & |\phi_k| < \phi_{sdec} \\ \omega_{max} * \text{sign}(\phi_k), & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.1)$$

avec :

$$\phi_{sdec} = \frac{\omega_{max}^2}{2\alpha_s}. \quad (3.2)$$

3.4.2 Évaluation de la vitesse linéaire

L'objectif consiste maintenant à identifier une loi de vitesse linéaire réduisant efficacement la distance avec le prochain point de passage, étant donné une vitesse linéaire maximale v_{max} , une décélération maximale a_s et une vitesse cible v_i à atteindre sur le prochain point de passage³. Pour une bonne réactivité, la loi de commande est indépendante du temps et varie selon l'écart de configuration. En supposant une erreur d'orientation nulle, la loi de commande recherchée⁴ à l'instant k est la suivante (voir l'annexe A.2 pour la démonstration) :

$$v_k^*(\phi_k, d_k, v_i, m_i) = \begin{cases} v_{max} \cdot m_i & d_k \geq d_{sdec} \\ m_i \cdot \sqrt{2d_k a_s + (v_i)^2} & d_k < d_{sdec} \end{cases}, \quad (3.3)$$

où :

$$d_{sdec}(v_i) = \frac{v_{max}^2 - (v_i)^2}{2 \cdot a_s}, \quad (3.4)$$

qui est définie strictement positive puisque $|v_i| \leq v_{max}$.

L'équation (3.3) doit maintenant être adaptée à un écart angulaire ϕ_k non nul. Comme il a été mentionné à la section 3.3, la vitesse linéaire doit décroître lorsque l'écart angulaire augmente, selon les paramètres β et λ (voir leur définition au tableau 3.1). Afin d'obtenir ce comportement,

³Les vitesses cibles $v_i, i \in \{1, \dots, N\}$ d'atteinte des points de passage assurent la continuité de la commande (leur évaluation est présentée à la section 3.4.5).

⁴L'équation 3.3 produit des transitions de vitesses continues puisque $v_k = v_{max} \cdot m_i$ lorsque $d_k = d_{sdec}$ et $v_k = v_i$ lorsque $d_k = 0$.

l'équation (3.3) est modifiée comme suit :

$$v_k^*(\phi_k, d_k, v_i, m_i) = \begin{cases} \frac{v_{max} \cdot m_i}{1 + |\beta \phi_k|^\lambda} & d_k \geq d_{sdec} \\ \frac{m_i \cdot \sqrt{2d_k a_s + (v_i)^2}}{1 + |\beta \phi_k|^\lambda} & d_k < d_{sdec} \end{cases} \quad (3.5)$$

La forme des chemins effectifs résultant de la combinaison des lois de commande linéaire et angulaire diffère légèrement selon les deux types de définition de l'écart de configuration présentés ci-dessous.

Écart de configuration relatif à la cible

Supposant que la configuration de la plate-forme est $\chi_k = \{x_k, y_k, \theta_k\}$, l'écart de configuration relatif au point de contrôle cible est illustré à la figure 3.2 et est décrit par les paramètres suivants :

- d_k : la distance euclidienne entre la position de la plate-forme estimée $\{x_k, y_k\}$ et le prochain point de passage w_i à un instant k ;
- ϕ_k : l'écart angulaire entre l'orientation de la plate-forme et la droite liant sa position au point de passage w_i :

$$\phi_k^{(w)}(x_k, y_k, \theta_k, x_i, y_i, m_i) = \begin{cases} \Gamma(\text{atan2}(y_i - y_k, x_i - x_k) - \theta_k, -\pi, \pi) & m_i = 1 \\ \Gamma(\text{atan2}(y_i - y_k, x_i - x_k) - \theta_k + \pi, -\pi, \pi) & m_i = -1 \end{cases} \quad (3.6)$$

où $\phi_k \in [-\pi, \pi]$ et $\Gamma(\alpha, \theta_{min}, \theta_{max})$ est une fonction qui retourne l'angle α exprimé entre θ_{min} et θ_{max} .

En combinant la loi de vitesse linéaire (3.5) avec celle de la vitesse angulaire (3.1) à la section 3.4.1, les chemins effectifs obtenus selon différentes orientations initiales de la plate-forme formeront un champ de forme cardioïde comme celui illustré à la figure 3.7.

La figure 3.3 présente l'impact de β sur la forme du chemin effectif lorsque l'écart angulaire initial est de $3\pi/4$. Plus la valeur de β augmente, plus le chemin effectif s'aplatit vers le point de passage. L'augmentation de λ produit un effet similaire et la variation de la vitesse maximale ne modifie pas cette forme générale de courbes. L'amplitude des paramètres β et λ peut ainsi être ajustée facilement par essais et erreurs selon le niveau d'aplatissement désiré de la courbe et en s'assurant que la condition de convergence de la section 3.5 est respectée. L'exemple 3.8.1 des expérimentations montrera que chaque configuration des paramètres de conduite produit une forme de trajectoire distinctive et valable.

Bien que cette définition de l'erreur de configuration impose que chaque point de passage soit traversé, les trajectoires admissibles entre les points restent toutefois peu contraintes. Lorsque les

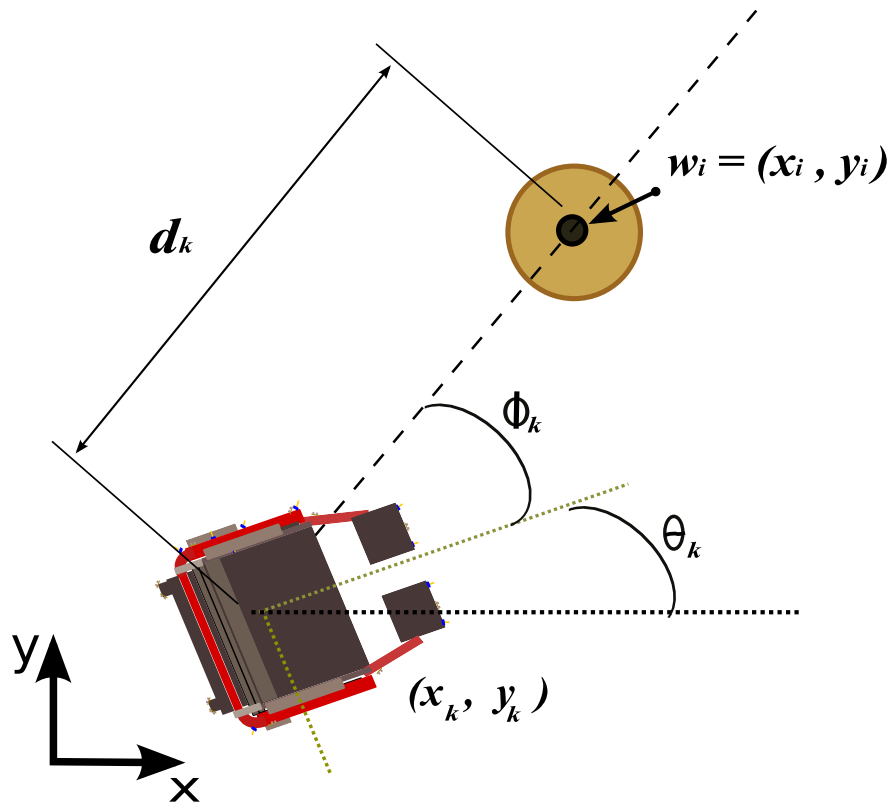


Figure 3.2 Représentation de l'écart de configuration.

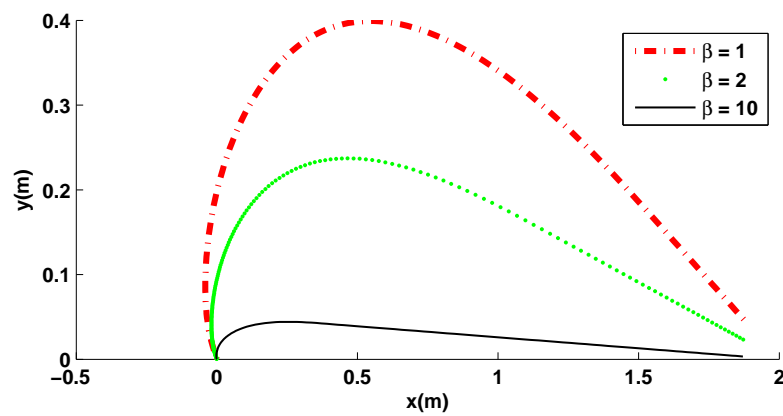


Figure 3.3 Effet de la variation du coefficient de décroissance de la vitesse linéaire β sur le chemin effectif obtenu.

points de passage sont éloignés et obtenus en fonction des obstacles, on recherche généralement des trajectoires assez rectilignes d'un point de passage à l'autre. Le suivi des segments reliant les points sera donc entrepris ci-dessous en définissant l'écart d'orientation selon les segments liant les points.

Écart de configuration relatif aux segments reliant les points de passage

L'objectif d'obtenir un parcours rectiligne entre les points de contrôle implique la réalisation d'un *suivi de segments de droite*. Les segments de droite $s_i, i = 1, \dots, N$ sont calculés lors de l'initialisation du suivi, où s_1 joint la position initiale de la plate-forme au premier point de passage et les segments suivants, $s_i, i = 2, \dots, N$, joignent les points consécutifs pris deux à deux. Chaque segment s_i passe par le point $\{x_i, y_i\}$ et a une orientation θ_i .

Le suivi de segments se réalise implicitement à l'aide des équations cinématiques présentées plus haut en définissant l'écart d'orientation de manière à ce que la plate-forme *atterrisse* graduellement sur le segment à la manière d'un avion sur une piste. Ceci exige que le segment soit de longueur suffisante, autrement l'objectif se résume à passer par le point de passage avec un écart d'orientation défini selon la cible.

Pour produire l'atterrissage, l'angle visé $\theta_k^{(att)}$ avec le segment est d'autant plus faible que la plate-forme en est rapprochée. Au-delà d'une distance du segment, nommée $d_{max}^{(att)}$, l'angle d'atterrissage est constant et de valeur maximale θ_{max}^{att} . Ainsi, en supposant que la distance avec le segment est $d_k^{(att)}$, l'angle d'atterrissage est défini comme suit :

$$\theta_k^{(att)}(d_k^{(att)}) = \begin{cases} \theta_{max}^{att} \frac{d_k^{(att)}}{d_{max}^{(att)}} & d_k^{(att)} < d_{max}^{(att)} \\ \theta_{max}^{att} & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.7)$$

L'écart d'orientation lié à l'objectif d'atterrir sur le segment est donc :

$$\phi_k^{(att)} = \begin{cases} \Gamma(\phi_k^{(att)} - \theta_k, -\pi, \pi) & m_i = 1 \\ \Gamma(\phi_k^{(att)} - \theta_k + \pi, -\pi, \pi) & m_i = -1 \end{cases} \quad (3.8)$$

La figure 3.4 illustre la configuration de la plate-forme par rapport au segment s_i , où l'atterrissage est possible en (a) et impossible en (b). L'atterrissage est jugé possible si son angle $\phi_k^{(att)}$ est supérieur à l'angle de la cible $\phi_k^{(w)}$. Ainsi, l'écart d'orientation $\phi_k^{(s)}$ du suivi de segment sera :

$$\phi_k^{(s)} = \begin{cases} \phi_k^{(w)} & |\phi_k^{(att)}| < |\phi_k^{(w)}| \\ \phi_k^{(att)} & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.9)$$

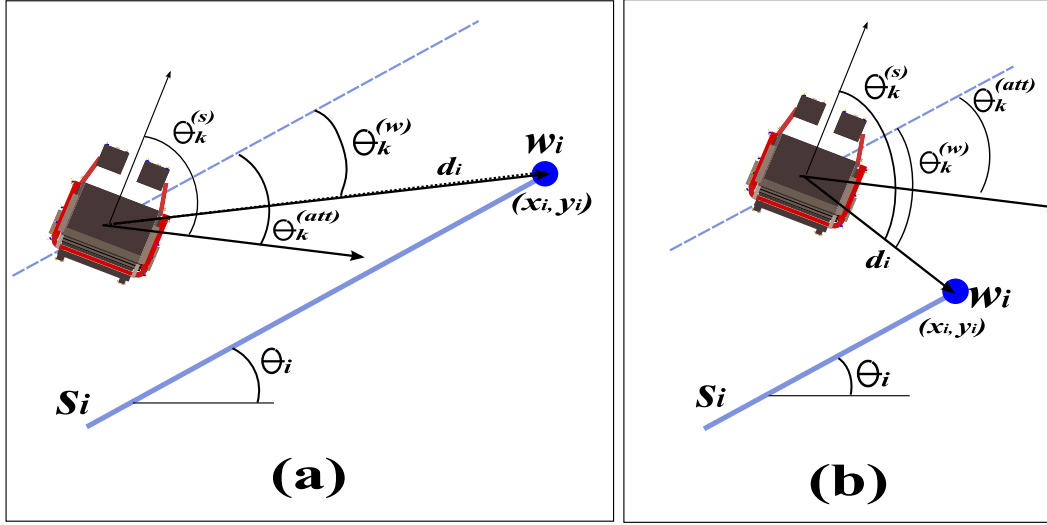


Figure 3.4 Illustration de l'angle d'atterrissage, de la cible et de l'écart d'orientation pour un atterrissage possible (a) et impossible (b).

3.4.3 Limites d'accélération

Afin de garantir le respect des limites d'accélération malgré les changements de cible, les vitesses de référence $\{v_k^{ref}, \omega_k^{ref}\}$ sont obtenues en limitant la variation des vitesses anticipatives $\{v_k^*, \omega_k^*\}$ par les limites d'accélération $\{a_{max}, \alpha_{max}\}$ (les décélérations étant déjà prises en considération dans les lois de commande). Il est à noter que la valeur de l'accélération angulaire est critique, puisqu'une valeur trop faible peut provoquer un chemin effectif sinueux (ceci sera démontré dans les expérimentations).

3.4.4 Sélection automatique des modes de déplacement

Dans certaines circonstances, il s'avère pratique d'effectuer un choix automatique des modes de déplacement. Les modes de déplacement $\{m_i, i = 1, \dots, N\}$ sont déterminés à l'aide des distances $\{D_i, i = 1, \dots, N\}$ entre chaque paire de points consécutifs (où le premier point correspond à la position de la plate-forme) et des angles $\{\phi_i, i = 1, \dots, N - 2\}$ à chaque changement de cible⁵. Ainsi, le mode de déplacement m_i d'un point w_i sera vers l'avant dès que :

- la distance D_i avec le point précédent dépasse une distance maximale de déplacement en mode arrière $D_{max}^{m=-1}$;
- l'écart angulaire ϕ_i est inférieur à un seuil ϕ^{FB} si le mode d'atteinte du point précédent m_{i-1} était vers l'avant ;
- l'écart angulaire ϕ_i est supérieur à un seuil ϕ^{BF} si le mode d'atteinte du point précédent m_{i-1}

⁵Un mode de déplacement par défaut $m_0 = 1$ doit être assigné pour l'évaluation du premier mode m_1 .

était vers l'arrière.

3.4.5 Vitesses linéaires cibles sur les points de passage

L'évaluation de la vitesse linéaire d'atteinte de chaque point de passage $\{v_i, i = 1, \dots, N\}$ est nécessaire pour obtenir une commande qui assure la continuité et l'efficacité du mouvement. Le problème consiste à prédire, pour chaque point w_i , la vitesse requise v_i permettant de s'approcher du point suivant, à une vitesse donnée v_{i+1} et selon sa position relative. Cette évaluation doit ainsi s'effectuer du dernier au premier point de passage, en assignant la valeur de la vitesse finale v_N . Les calculs dépendent des distances $\{D_i, i = 1, \dots, N\}$ entre chaque paire de points consécutifs, de l'écart angulaire anticipé à chaque changement de cible $\{\phi_i, i = 1, \dots, N - 2\}$ et de la séquence de mode de déplacement $\{m_i, i = 1, \dots, N\}$ (voir figure 3.5). Les vitesses cibles sont obtenues par l'algorithme de rétropropagation 1.

Algorithme 1 Algorithme de rétropropagation utilisé pour l'estimation des vitesses cibles sur les points de passage

```

 $v_N = 0$ 
pour  $i = N$  à 2 faire
  si  $m_{i-1} \neq m_i$  alors
     $v_{i-1} = 0$ 
  sinon
    Actualiser  $d_{sdec}(v_i)$  avec (3.4);
    Estimer  $v_{i-1}(\phi_i, m_i, D_i, v_i)$  avec (3.5);
  finsi
fin pour

```

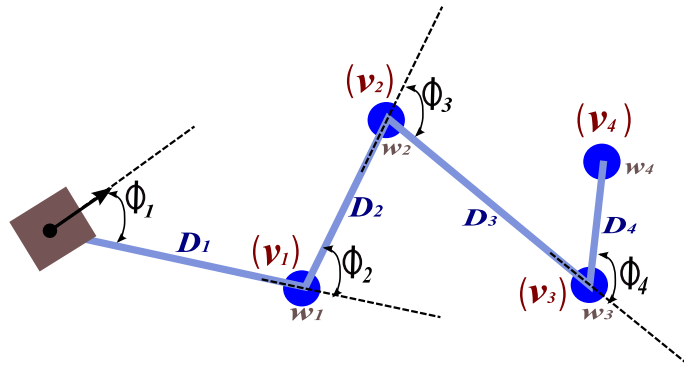


Figure 3.5 Paramètres utilisés pour l'évaluation des modes de déplacement et des vitesses cibles sur les points de passage.

3.4.6 Changement de cible

Le changement de cible s'effectue aussitôt que la cible courante est atteinte, ce qui implique $d_{i,k} < r_i$. L'arrêt survient lorsque la dernière cible est atteinte.

3.5 Analyse de la convergence

La convergence du suivi exige que chaque point de passage w_i soit traversé à une distance inférieure ou égale à son rayon de précision r_i . Nous présenterons dans cette section les conditions à satisfaire pour qu'une commande soit considérée comme étant *divergente*. Nous chercherons ensuite à identifier les écarts de configurations pour lesquels les conditions de divergence soient satisfaites. Finalement, nous expliquerons comment garantir la convergence du suivi.

3.5.1 Conditions d'une commande divergente

Une commande est supposée *divergente* si elle n'engendre aucun rapprochement avec le point de passage, même en étant poursuivie dans le temps. Ainsi, pour qu'une commande soit divergente, les deux conditions suivantes doivent minimalement être satisfaites :

1. la commande engendre une augmentation instantanée de la distance avec le point de passage ;
2. si la commande est poursuivie dans le temps, il est possible que la plate-forme ne revienne jamais vers le point de passage à une distance de séparation inférieure à la distance courante.

À chaque instant, la variation de la distance euclidienne avec le point de passage w_i peut être évaluée par l'expression :

$$\Delta d_k = -|v_k^*| \cdot \cos(\phi_k)$$

La première condition de divergence s'exprime donc ainsi :

$$|\phi_k| \geq \pi/2 \quad (3.10)$$

La seconde condition est seulement satisfaite si le rayon de courbure instantané r_k du chemin effectif est supérieur à la distance du point de passage :

$$|r_k| \geq d_k \quad (3.11)$$

où le rayon de courbure est :

$$r_k = v_k^* / \omega_k^*. \quad (3.12)$$

Cette condition est illustrée à la figure 3.6 pour un écart angulaire de $\pi/2$. Tous les chemins ayant un rayon de courbure supérieur à la distance de séparation courante d_k ne produiront jamais de

rapprochement vers le point de passage.

3.5.2 Région de convergence des écarts de configuration

En se référant aux équations (3.1) et (3.3), la vitesse linéaire v_k^* , la vitesse angulaire ω_k^* et, par conséquent, le rayon de courbure r_k varient tous uniquement en fonction de l'écart de configuration représenté par les paramètres ϕ_k et d_k , la vitesse cible sur le point de passage v_i et le mode de déplacement m_i . En utilisant l'équation (3.12), nous pouvons exprimer le rayon de courbure en fonction de l'écart de configuration. On aura ainsi quatre rayons de courbure possibles variant selon les valeurs de d_{sdec} et ϕ_{sdec} . Nous pouvons démontrer (voir annexe A.3) que la zone où les deux conditions de divergence (3.10) et (3.11) peuvent simultanément être satisfaites se limite à un cercle de rayon r_i^{lim} centré sur la cible. Le rayon r_i^{lim} et sa valeur maximale sont donnés au tableau 3.2 selon les quatre circonstances $\{A, B, C, D\}$ qui sont fonctions des valeurs de d_{sdec} et ϕ_{sdec} (voir annexe A.4) pour l'identification de la circonstance).

Condition pour garantir la convergence du suivi

Nous avons vu que la région de divergence est bornée par un cercle de rayon r_i^{lim} centré sur le point de passage cible. Or, comme la région extérieure au cercle implique la convergence vers le point de passage, la trajectoire de la plate-forme pourra converger vers le périmètre du cercle si la précision d'atteinte r_i est inférieure à son rayon r_i^{lim} . Ceci est vérifié en simulation à la figure 3.7, où, puisque $r_i = 0$ m, tous les chemins effectifs convergent vers le périmètre de la zone de divergence de rayon r_i^{lim} , et ceci indépendamment de l'orientation initiale.

Toutefois, lorsque la zone de divergence est comprise dans la précision d'atteinte, $r_i^{lim} < r_i$, un changement de cible ou l'arrêt surviendra avant que la plate-forme n'atteigne la zone de divergence.

Tableau 3.2 Rayons de la zone de divergence et sa valeur maximale selon l'angle critique ϕ_{sdec} et la distance critique d_{sdec} .

| | ϕ_{sdec} | d_{sdec} | r_i^{lim} | $\max\{r_i^{lim}\}$ |
|---|---------------|-----------------|---|--|
| A | $> \pi/2$ | $> (r_i)^{lim}$ | $\frac{v_{max}}{(1+ \beta\pi/2 ^\lambda)\sqrt{\pi\alpha_s}}$ | $\frac{v_{max}}{\sqrt{\pi\alpha_s}}$ |
| B | $< \pi/2$ | $> (r_i)^{lim}$ | $\frac{v_{max}}{(1+ \beta\pi/2 ^\lambda)\omega_{max}}$ | $\frac{v_{max}}{\omega_{max}}$ |
| C | $> \pi/2$ | $< (r_i)^{lim}$ | $\frac{a_s + \sqrt{a_s^2 + (1+ \beta\pi/2 ^\lambda)^2(\pi\alpha_s)(v_i)^2}}{(1+ \beta\pi/2 ^\lambda)^2(\pi\alpha_s)}$ | $\frac{a_s + \sqrt{a_s^2 + \pi\alpha_s v_i^2}}{\pi\alpha_s}$ |
| D | $< \pi/2$ | $< (r_i)^{lim}$ | $\frac{a_s + \sqrt{a_s^2 + (1+ \beta\pi/2 ^\lambda)^2\omega_{max}^2(v_i)^2}}{(1+ \beta\pi/2 ^\lambda)^2\omega_{max}^2}$ | $\frac{a_s + \sqrt{a_s^2 + \omega_{max}^2 v_i^2}}{\omega_{max}}$ |

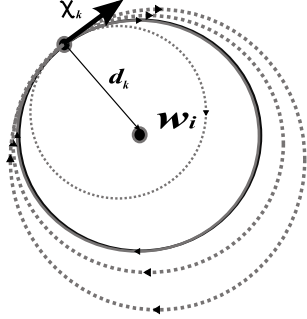


Figure 3.6 Illustration de la deuxième condition de divergence pour un écart angulaire de $\pi/2$.

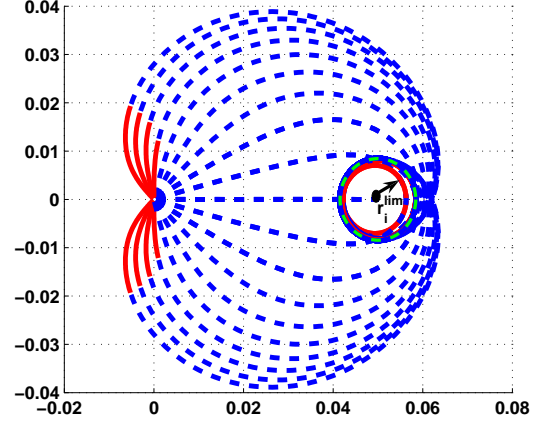


Figure 3.7 Champ de mouvement vers un point de passage obtenu en faisant varier l'orientation initiale.

La convergence est ainsi garantie dès que la condition suivante est satisfaite :

$$r_i > r_i^{lim}, \forall i = 1, \dots, N. \quad (3.13)$$

Pour respecter une précision spécifique de l'atteinte des points de passage, il suffit dès lors de choisir une valeur de β produisant des rayons de divergence suffisamment petits. Le seuil minimal de β permettant l'atteinte d'une précision r_i , nommé β_s , est indiqué dans le tableau 3.3 en fonction des contextes $\{A, B, C, D\}$ du tableau 3.2 (voir les calculs à l'annexe A.5)⁶.

3.6 Planification temporelle

Cette section présente comment atteindre le dernier point de passage à un temps précis T_d en adaptant les paramètres cinématiques nominaux $\{v_{av}^0, v_{ar}^0, \omega_{max}^0, a_{max}^0, a_s^0, \alpha_{max}^0, \alpha_s^0\}$. En prédisant le temps requis⁷ T_p pour atteindre le dernier point, le facteur d'échelle η est :

$$\eta = T_p / T_d.$$

⁶Remarquez que l'évaluation du coefficient pour les contextes C et D ne peut se réaliser en une étape, car les valeurs de v_i dépendent à priori de la valeur du coefficient. Point de vu pratique, il est préférable de travailler avec le rayon de divergence maximal, indépendamment de la séquence, et d'adapter le coefficient de décroissance en conséquence afin de garantir la convergence pour toutes séquences en cause. Ceci suppose de poser $v_i = \max\{v_F, v_B\}$ (ce qui implique aussi d'utiliser seulement les formules des lignes A et B du tableau 3.3) et d'utiliser le rayon de précision minimale en remplaçant r_i par $\min\{r_i\}_{i=1, \dots, N}$ dans les expressions de β_s .

⁷Le temps requis T_p pour l'atteinte du dernier point de passage peut être prédit en appliquant les lois de commande cinématiques étape-par-étape sur des poses prédites, jusqu'à l'atteinte du dernier point.

Tableau 3.3 Valeur minimale du coefficient de décroissance de la vitesse linéaire β assurant la convergence.

| | β_s (si $r_i < \max\{r_i^{lim}\}$) |
|---|--|
| A | $\frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{v_{max}}{r_i \sqrt{\pi \alpha_s}} - 1}$ |
| B | $\frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{v_{max}}{r_i \omega_{max}} - 1}$ |
| C | $\frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{2r_i \cdot a_s + (v_i)^2}{r_i^2 (\pi \alpha_s)} - 1}$ |
| D | $\frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{2r_i \cdot a_s + (v_i)^2}{r_i^2 \omega_{max}^2} - 1}$ |

Les paramètres adaptés s'exprimeront alors comme suit :

$$v_{av} = v_{av}^0 \cdot \eta \quad (3.14)$$

$$v_{ar} = v_{ar}^0 \cdot \eta \quad (3.15)$$

$$\omega_{max} = \omega_{max}^0 \cdot \eta \quad (3.16)$$

$$a_{max} = a_{max}^0 \cdot \eta^2 \quad (3.17)$$

$$a_s = a_s^0 \cdot \eta^2 \quad (3.18)$$

$$\alpha_{max} = \alpha_{max}^0 \cdot \eta^2 \quad (3.19)$$

$$\alpha_s = \alpha_s^0 \cdot \eta^2 \quad (3.20)$$

$$(3.21)$$

Cette adaptation a pour propriété de maintenir identique le chemin effectif parcouru (en supposant une réponse dynamique parfaite). Le fonctionnement et les propriétés du contrôleur restent ensuite identiques au cas où aucune contrainte de temps n'est appliquée, ce qui implique une commande toujours appropriée à la configuration mesurée de la plate-forme qu'elle soit perturbée ou non⁸. La contrainte de temps est réalisable tant que les paramètres cinématiques adaptés respectent les limitations du système.

3.7 Compensation des limitations dynamiques

L'objectif de cette section est d'offrir des lois de commande permettant de compenser l'effet des pôles et des délais de la réponse dynamique. Nous supposons que la réponse des vitesses linéaire et angulaire est de premier ordre, comporte un délai τ et des pôles distincts respectivement notés ψ^{lin}

⁸Une forte perturbation, par exemple due aux glissements, affectera toutefois la durée du parcours.

et ψ^{ang} .

La compensation d'un délai est obtenu en commandant les vitesses qui devront être appliquées après la durée du délai, lesquelles dépendent de la pose prédite de la plate-forme à ce moment. La pose prédite est obtenue de manière itérative en intégrant les vitesses de référence du contrôleur de suivi (obtenues à la section 3.4) à partir de la pose et des vitesses courantes (comme pour le respect de contraintes de temps). Supposant ΔT l'intervalle de temps entre chaque itération, il y aura $\kappa = \tau/\Delta T$ itérations nécessaires à la prédiction. La loi de commande prenant en charge le délai sera ainsi :

$$v_k^{ant} = v_{k+\kappa}^{ref} \quad (3.22)$$

$$\omega_k^{ant} = \omega_{k+\kappa}^{ref} \quad (3.23)$$

où $\{v_{k+\kappa}^{ref}, \omega_{k+\kappa}^{ref}\}$ est la commande appropriée à la pose prédite $\chi_{k+\kappa}$.

Traditionnellement, les pôles d'un système sont déplacés en intégrant des zéros dans la réponse dynamique. Bien que ceci permette une réponse plus rapide, une attention particulière doit être investie pour s'assurer de la stabilité et, en somme, aucun paramétrage ne permettra un écart nul entre les vitesses de référence et celles obtenues.

Plutôt que d'altérer la réponse dynamique en déplaçant les pôles, il est proposé d'altérer la consigne afin que cette dernière provoque la vitesse désirée, considérant l'effet du pôle. Cette commande compensatrice $\{v_k^{cmp}, \omega_k^{cmp}\}$ est évaluée comme suit :

$$v_k^{cmp} = \left[v_k^{ant} - v_{k-1}^{ant} \cdot e^{\psi^{lin} \cdot \Delta T} \right] / \left[1 - e^{\psi^{lin} \cdot \Delta T} \right] \quad (3.24)$$

$$\omega_k^{cmp} = \left[\omega_k^{ant} - \omega_{k-1}^{ant} \cdot e^{\psi^{ang} \cdot \Delta T} \right] / \left[1 - e^{\psi^{ang} \cdot \Delta T} \right] \quad (3.25)$$

La commande compensatrice variera toutefois avec une amplitude d'autant plus importante que l'intervalle de temps ΔT est faible et que la référence varie rapidement. Il est donc important de s'assurer que la commande compensatrice reste, en général, réalisable (inférieure aux vitesses maximales pouvant être commandées). Nous montrerons dans les expérimentations qu'une commande compensatrice réalisable permet d'obtenir une réponse qui suit exactement la consigne pour un système de premier ordre.

3.8 Résultats expérimentaux

Les résultats expérimentaux sont subdivisés en deux sous-sections selon qu'ils ont été réalisés en simulation avec une erreur de configuration relative aux cibles, ou sur une plate-forme réelle avec

une erreur de configuration relative aux segments⁹. Ces exemples démontreront les comportements de conduites, les conditions de stabilité, la compensation dynamique et le respect de contraintes temporelles. Les différents profils de conduites utilisés sont présentés au tableau 3.4.

3.8.1 Simulation et écart de configuration relatif aux cibles

Ces simulations, réalisées avec Matlab, présentent le comportement de conduite, les conditions de stabilité et la compensation dynamique.

Analyse des comportements de conduite

Respect du profil de conduite A La séquence de points $\{w_1, w_2, \dots, w_{16}\}$, de la figure 3.8 est particulièrement non-uniforme pour démontrer la capacité du contrôleur à gérer des transitions variées. La figure 3.8 présente le chemin effectif obtenu en simulation et la figure 3.9 montre l'évolution temporelle des vitesses et des écarts de configuration. L'accélération maximale observée est de 0.25 m/s en linéaire et de 1.0 rad/s^2 en angulaire, ce qui correspond aux valeurs de a_{max} et α_{max} . Les vitesses linéaires maximales de 0.5 m/s en mode arrière et de 1.0 m/s en mode avant sont brièvement atteintes respectivement à 51 et 66 secondes. La vitesse angulaire maximale de 0.4 rad/s est atteinte à plusieurs reprises. La distance maximale entre le chemin effectif et un point de passage est de 0.10 m sur w_7 , ce qui est inférieur à la distance maximale de 0.15 m et respecte ainsi la précision désirée. Le chemin effectif est lisse sauf, évidemment, lorsque le mode de déplacement change sur w_{13} et w_{14} . La durée totale du parcours est de 68.5 secondes. Cet exemple confirme que les vitesses de référence respectent les contraintes cinématiques et que la trajectoire effective respecte la précision désirée.

Suivi d'une trajectoire spirale À la figure 3.10, le suivi d'une séquence spirale démontre l'adaptation implicite des vitesses de référence à des trajectoires dont le rayon de courbure est en perpé-

⁹Cette subdivision vise à couvrir l'ensemble des concepts tout en limitant le nombre d'expériences présentées.

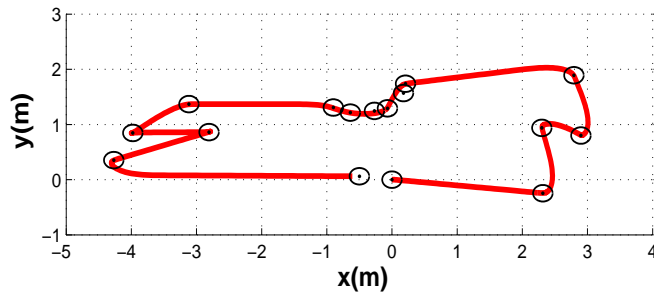
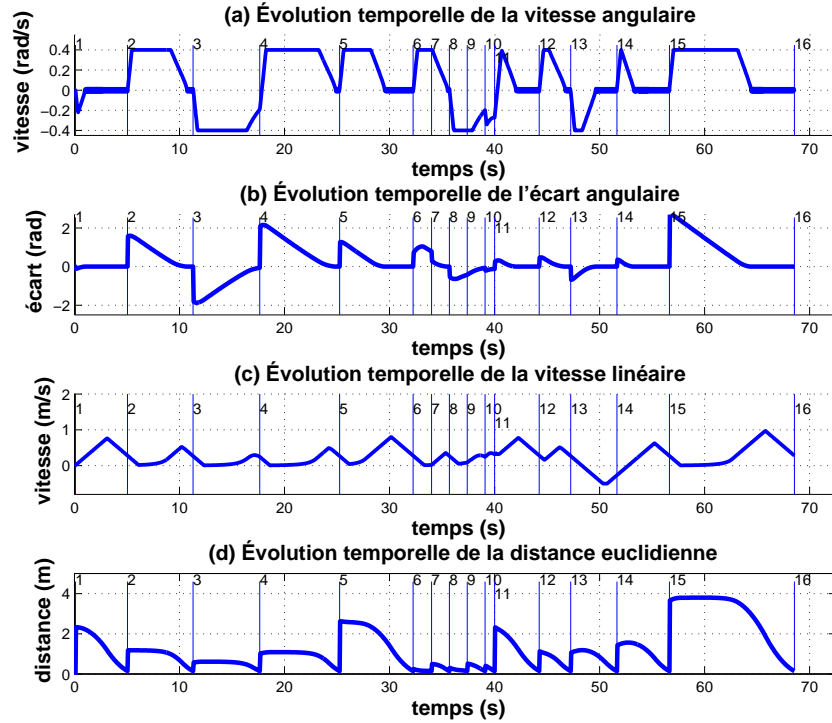


Figure 3.8 Chemin effectif obtenu avec une séquence de points de passage $\{w_1, w_2, \dots, w_{16}\}$.

Tableau 3.4 Profils de conduite utilisés pour les expérimentations.

| | <i>A</i> | <i>B</i> | <i>C</i> | <i>D</i> | <i>E</i> | <i>F</i> | <i>G</i> | <i>H</i> | <i>u</i> |
|------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|------------|
| v_F | 1.00 | 1.00 | 0.80 | 1.50 | 5.00 | 2.00 | 2.00 | 0.30 | m/s |
| V_B | 0.50 | 0.50 | 0.50 | 1.00 | 5.00 | 1.50 | 3.00 | 0.30 | m/s |
| ω_{max} | 0.40 | 0.40 | 0.40 | 0.60 | 5.00 | 0.70 | 1.70 | 0.15 | rad/s |
| a_s | 0.25 | 0.25 | 0.60 | 0.60 | 1.00 | 0.60 | 0.90 | 0.15 | m/s^2 |
| a_{max} | 0.25 | 0.50 | 0.60 | 0.60 | 2.00 | 1.00 | 2.00 | 0.15 | m/s^2 |
| α_s | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.60 | 1.00 | 0.40 | 0.70 | 0.10 | rad/s^2 |
| α_{max} | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 0.60 | 2.00 | 1.00 | 1.00 | 0.40 | rad/s^2 |
| λ | 2.00 | 2.00 | 1.50 | 3.00 | 2.00 | 1.50 | 1.90 | 3.00 | - |
| β | 4.50 | 4.50 | 7.00 | 6.00 | 6.00 | 3.00 | 3.60 | 8.50 | rad^{-1} |
| r | 0.15 | 0.15 | 0.10 | 0.08 | 0.25 | 0.30 | 0.27 | 0.05 | m |
| ϕ^{FB} | 2.35 | 2.35 | 2.35 | 1.58 | 2.35 | 1.70 | 1.90 | 2.35 | rad |
| ϕ^{BF} | 1.57 | 1.57 | 1.70 | 1.57 | 1.57 | 1.57 | 1.50 | 1.57 | rad |
| $D_{max}^{m=-1}$ | 1.20 | 1.20 | 1.20 | 1.20 | 1.20 | 1.20 | 1.20 | 1.20 | m |

Figure 3.9 Évolution temporelle de la vitesse angulaire (a), de l'écart angulaire (b), de la vitesse linéaire (c) et de la distance euclidienne (d) de la séquence $\{w_1, w_2, \dots, w_{16}\}$.

tuelle évolution. La plate-forme débute au point $\{0,0\}$, se rend directement au point $\{-2.2,0.8\}$ et suit la spirale pour revenir tranquillement vers l'origine. On observe à la figure 3.11 (b) que la vitesse de référence linéaire diminue et en (a) que la vitesse angulaire augmente graduellement au fur et à mesure que le rayon de courbure diminue. Ce comportement permet de suivre précisément la trajectoire, d'obtenir une exécution rapide qui maintient néanmoins une faible accélération centripète.

Suivi de points alignés À la figure 3.12, une séquence de points alignés est suivie. La distance entre les points diminue graduellement pour illustrer le comportement résultant de plusieurs niveaux d'espacement entre les points. Dans cet exemple, le chemin effectif demeure assez rectiligne et efficace, car l'accélération angulaire maximale est suffisamment élevée. Si l'accélération est trop faible, par exemple de 0.3 rad/s^2 à l'expérience de la figure 3.13, le chemin effectif oscille avec une demi-période égale à la distance entre les points (jusqu'à une période minimale). La réalisation de trajectoires courbes reste malgré tout inévitable puisque l'erreur de configuration, par rapport à la cible courante, est graduellement compensée jusqu'à son atteinte. Des mouvements plus rectilignes seront offerts, à la prochaine sous-section, par le mode effectuant le suivi des segments entre les points.

Signature du profil de conduite On démontre ici que chaque profil de conduite provoque une signature distincte¹⁰. Pour ce faire, une séquence de points décrivant le mot *BONJOUR* est parcourue, à la figure 3.14, selon différents profils de conduite. En (a), le profil B offre une *jolie* signature à la fois précise et *rondelette* d'une durée de 171 secondes¹¹. Le profil D employé en (b) cause un trajet d'une durée de 154 secondes, mais d'apparence plus rectiligne. Le profil F, en (c), provoque une signature rapide de 92.2 secondes, où la précision réduite et la rapidité d'exécution rendent la trajectoire plus *stylisée*. Son style prononcé peut s'avérer difficile à reproduire par un système utilisant un profil différent. En effet, un profil de conduite distinct et aussi rapide, tel que le G en (d) (qui cause un parcours d'une durée de 89 secondes), provoque des différences notables dans la géométrie des lettres et dans la position relative des traits (par exemple, le trait inférieur ne coupent plus les lettres *O-U-R*). D'autre part, d'essayer de repasser précisément sur le trait de la signature (c) avec un profil plus lent très précis, tel que réalisé en 554 secondes en (e) avec le profil H, cause un chemin plus ciselé d'apparence différente malgré que la position relative des traits soit quasi-identique. Cet exemple démontre une propriété intéressante de notre contrôleur : chaque profil de conduite provoque une *signature* distincte caractérisant les chemins effectifs résultants. Il apparaît aussi qu'une faible précision de l'atteinte des points laisse plus de place à l'expression du *caractère*

¹⁰Soulignons que l'obtention de *signatures* propres aux profils de conduite utilisés est due à la nature du contrôleur, où la trajectoire résulte du profil plutôt que d'être contrainte à priori (comme dans le cas des approches classiques).

¹¹Remarquez qu'une description subjective est suffisante pour différencier les styles des signatures présentées.

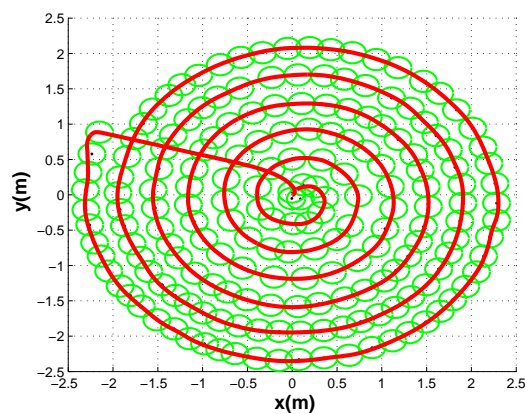


Figure 3.10 Suivi simulé d'une trajectoire spirale.

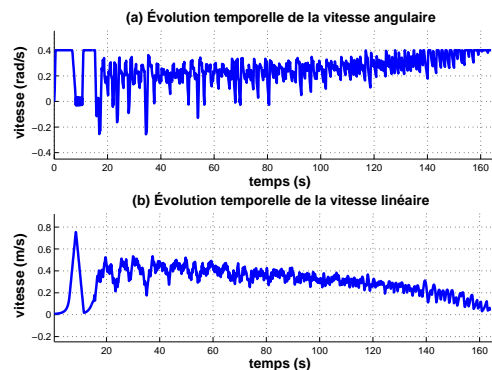


Figure 3.11 Vitesses simulées lors du suivi d'une trajectoire spirale.

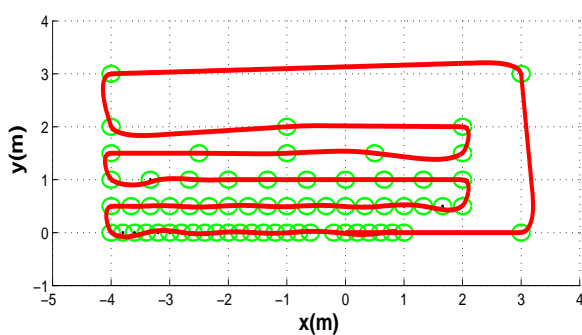


Figure 3.12 Suivi simulé de points alignés distancés d'un pas variable.

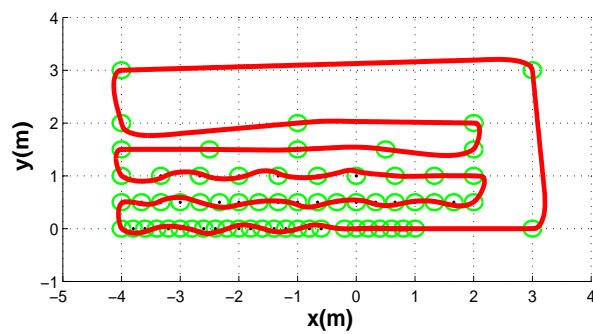


Figure 3.13 Suivi simulé de points alignés, lorsque l'accélération maximale est trop faible (de 0.3 rad/s^2).

distinctif du profil. Cet exemple démontre également que le comportement de la navigation peut facilement être ajusté selon le *style* de conduite désiré pouvant varier en fonction des préférences subjectives de l'utilisateur (dans le cas de l'application de fauteuil roulant motorisé).

Analyse de la convergence

Cette section analyse la conduite lorsque la condition de convergence (3.13) est mal satisfaite. La séquence de points de passage de la figure 3.8 est parcourue avec le profil de conduite A, lequel implique un rayon de précision minimal de 0.041 m (considérant que la vitesse maximale sur une cible est de 0.81 m/s).

À la figure 3.15, la précision désirée est réduite à 0.008 m et la condition de convergence (3.13) est donc insatisfaite. En conséquence, la plate-forme tourne indéfiniment autour du point w_{11} sur le périmètre de la zone de divergence. Comme la vitesse cible sur le point w_{11} est $v_{11} = 0.337 \text{ m/s}$, le rayon de la zone de divergence est de 0.017 m (donné par le cas D du tableau 3.2), ce qui est vérifié à la figure 3.16 qui représente un gros plan de la trajectoire autour du point w_{11} .

Afin d'obtenir une précision de 0.008 m, la valeur minimale du coefficient de décroissance β_s est de 10.15. En choisissant $\beta = 11$, on obtient un rayon de divergence de 0.0036 m, lequel satisfait la précision recherchée. La figure 3.17 présente le chemin effectif résultant de l'augmentation du coefficient de décroissance. Le chemin s'aplatit de manière à offrir des mouvements plus rectilignes. Le temps d'exécution, de 87.1 secondes, est toutefois augmenté par rapport à celui obtenu avec une précision de 0.15 m (qui était de 68.5 secondes).

En théorie, une précision infinie est possible si le coefficient de décroissance β tend vers l'infini. Ceci implique que la plate-forme s'oriente parfaitement sur chaque point de contrôle et avance parfaitement en ligne droite entre les points. En pratique, les limitations dynamiques de la plate-forme limitent la précision atteignable. D'une part, un coefficient β trop grand engendrera une progression extrêmement lente dans la mesure où la plate-forme ne peut s'orienter parfaitement vers sa cible. D'autre part, plus les rayons des points de passage sont petits (pour une grande précision), plus la compensation de la dynamique risque d'être insuffisante à ce que la convergence soit garantie¹². Il est donc important de bien choisir les rayons des points de passage en fonction de la précision du contrôle dynamique de la plate-forme et du besoin de l'application, sans quoi les ralentissements requis pour respecter cette précision seront mal justifiés.

¹²Remarquez qu'une compensation parfaite de l'effet des pôles est en pratique impossible à cause de l'imprécision du modèle dynamique (le système a normalement une réponse dynamique plus complexe qui, en plus, fluctue dans le temps).

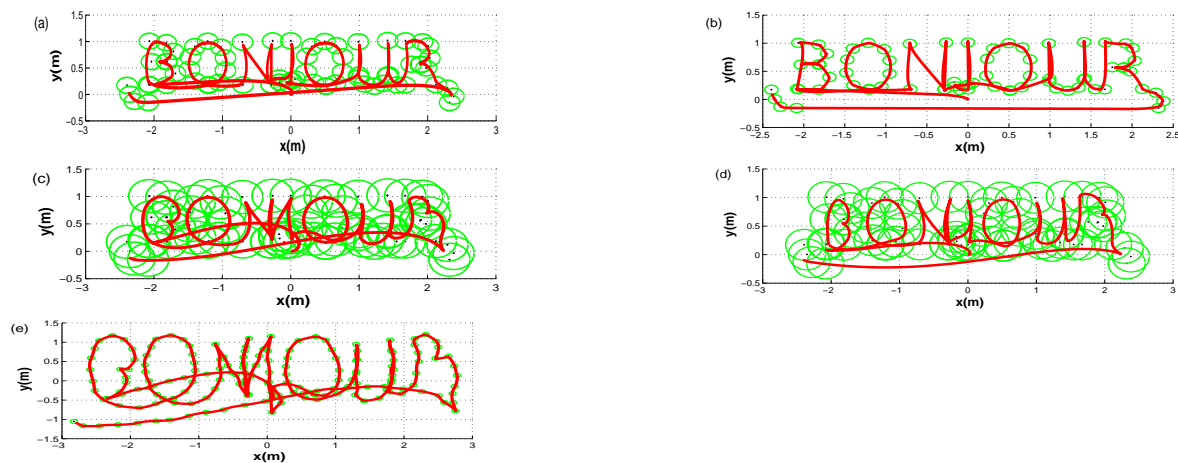


Figure 3.14 Suivi simulé du mot *BONJOUR* pour différents profils de conduite.

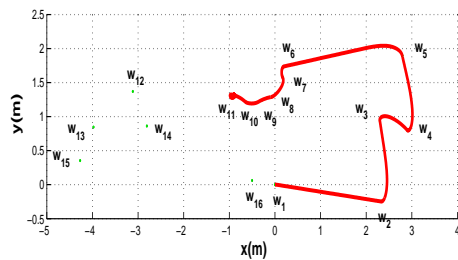


Figure 3.15 Exemple d'échec du suivi occasionné par un non-respect de la condition de convergence.

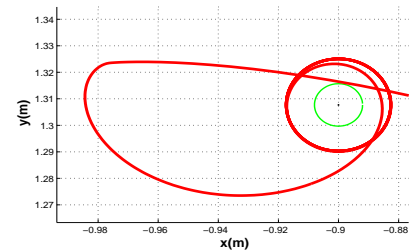


Figure 3.16 Convergence de la trajectoire vers la zone de divergence de rayon 0.17 m .

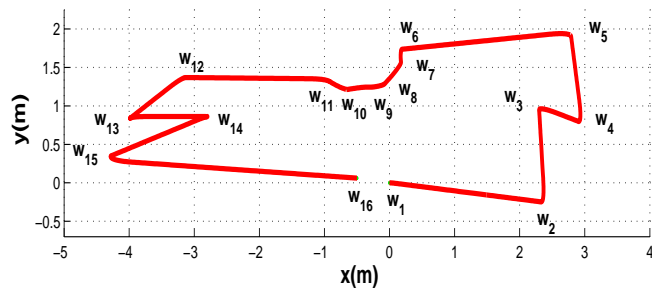


Figure 3.17 Un chemin effectif dont la précision d'atteinte des points est de $r = 0.008\text{ m}$, obtenu en augmentant la valeur du coefficient de décroissance de la vitesse linéaire β .

Compensation du délai et des pôles de la réponse dynamique

Le tableau 3.5 présente la durée du trajet et l'écart-type entre les vitesses de référence et celles obtenues selon la valeur des pôles, du délai et le type de compensation utilisé. Les tests sont effectués avec le profil A.

Nous supposons d'abord que la réponse dynamique linéaire de la plate-forme se caractérise par un pôle en $\psi^{lin} = -5 \text{ s}^{-1}$ et la réponse angulaire par un pôle en $\psi^{ang} = -4 \text{ s}^{-1}$. Si aucune compensation n'est utilisée, l'écart-type entre les vitesses de référence et celles obtenues est de 0.033 m/s en linéaire et de 0.058 rad/s en angulaire. Ces écarts se réduisent au bruit numérique lorsque la compensation de pôle est employée, comme on l'observe sur la figure 3.18 où les vitesses de référence sont parfaitement superposées aux vitesses obtenues grâce à la commande compensatrice.

Si la réponse dynamique comporte un délai de 0.5 seconde non compensé, les vitesses de référence, inappropriées au contexte courant, causent un chemin sinueux et lent (durée de 88.8 secondes) présenté à la figure 3.19. Lorsque la compensation de délai est appliquée, le chemin devient plus direct (voir figure 3.20) et la durée du parcours est réduite à 68.9 secondes. À la figure 3.21, nous observons qu'un délai non compensé engendre plusieurs oscillations de la vitesse angulaire, notamment de 0 à 5 secondes, à 37, de 70 à 78 et de 85 à 90 secondes, lesquelles n'apparaissent plus sur la figure 3.22 où le délai est compensé.

Lorsque le système subit à la fois le délai et les pôles et qu'aucune compensation n'est réalisée, la trajectoire sinueuse de la figure 3.23 est obtenue. Si les pôles seulement sont compensés, l'écart de suivi des vitesses de référence devient nul et le délai produit la trajectoire de la figure 3.24, laquelle est identique à celle obtenue en absence de pôle (voir figure 3.19). La compensation du délai seulement reproduit le parcours (à moins de 1% d'écart de durée) obtenu pour le système sans délai. La compensation des pôles et des délais reproduit sur la figure 3.26 la trajectoire obtenue sans pôle ni délai. Cet exemple illustre la capacité théorique de compensation exacte du délai et des pôles d'un système ayant une réponse du premier ordre.

3.8.2 Tests réels et écart de configuration relatif aux segments

Les expériences de cette section sont tous réalisées sur la plate-forme réelle (le fauteuil motorisé *FreeStyle F11*) de *Sunrise Medical*. La réponse dynamique de cette plate-forme se caractérise par un délai de 0.3 seconde, un pôle en -4 s^{-1} pour la vitesse linéaire et en -9 s^{-1} pour la vitesse angulaire. Le profile B de la table 3.4 est utilisé par défaut.

Compensation dynamique

Lorsque la séquence de points alignés est parcourue sans compensation dynamique, le trajet effective, à la figure 3.27, est sinueuse et d'une durée de 128 secondes. À la figure 3.28, la

Tableau 3.5 Écart-type entre la consigne en vitesse linéaire et angulaire selon la dynamique du système et la compensation utilisée.

| ψ^{lin} s^{-1} | ψ^{ang} s^{-1} | τ s | Comp.pôles <i>oui/non</i> | Comp.délai <i>oui/non</i> | σ^{lin} m/s | σ^{ang} rad/s | durée s |
|--------------------------|--------------------------|---------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------|---------------------------|--------------|
| 5 | 4 | 0 | non | - | 0.033 | 0.058 | 74.6 |
| 5 | 4 | 0 | oui | - | $3e^{-19}$ | $6e^{-18}$ | 68.3 |
| 0 | 0 | 0.5 | - | non | 0.00 | 0.00 | 88.8 |
| 0 | 0 | 0.5 | - | oui | 0.00 | 0.00 | 68.9 |
| 5 | 4 | 0.5 | non | non | 0.030 | 0.074 | 94.7 |
| 5 | 4 | 0.5 | oui | non | $3e^{-19}$ | $3e^{-18}$ | 88.9 |
| 5 | 4 | 0.5 | non | oui | 0.034 | 0.054 | 74.2 |
| 5 | 4 | 0.5 | oui | oui | 0.0 | $2e^{-18}$ | 68.8 |

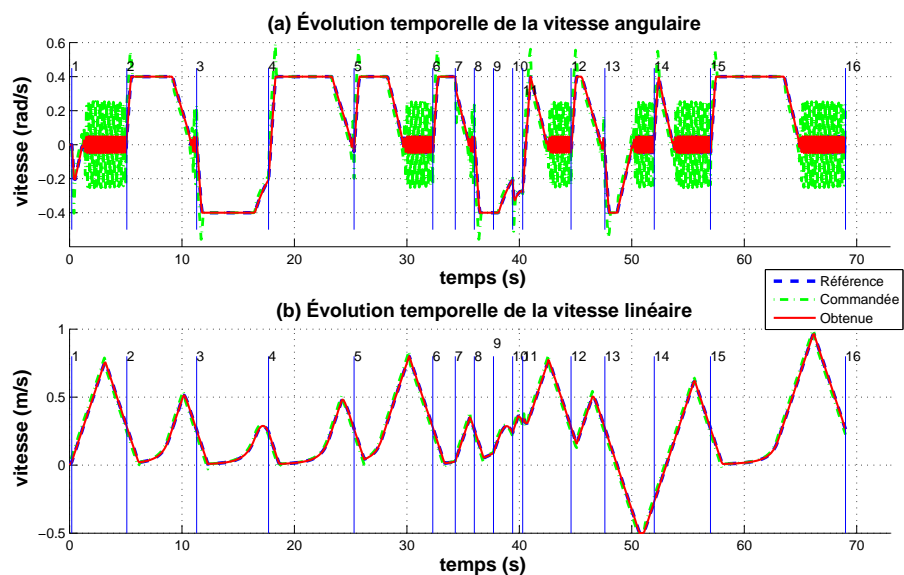


Figure 3.18 Vitesses obtenues avec compensation dynamique, supposant des pôles $\psi^{lin} = -5 s^{-1}$ et $\psi^{ang} = -4 s^{-1}$.

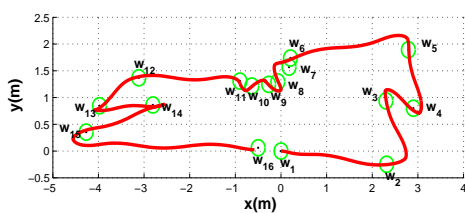


Figure 3.19 Chemin effectif obtenu sans compensation dynamique, supposant un délai $\tau = 0.5$ seconde.

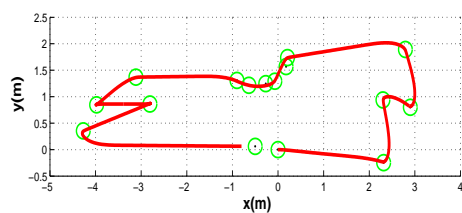


Figure 3.20 Chemin effectif obtenu avec compensation dynamique, supposant un délai $\tau = 0.5$ seconde.

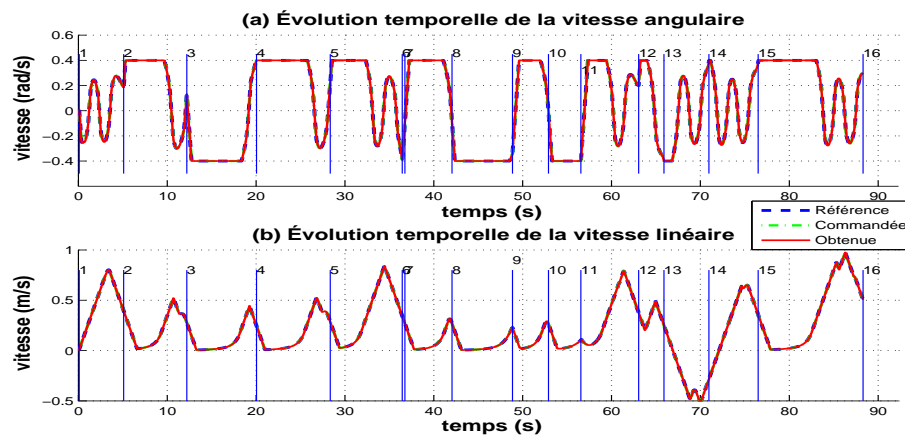


Figure 3.21 Vitesses obtenues sans compensation dynamique, supposant un délai $\tau = 0.5$ seconde.

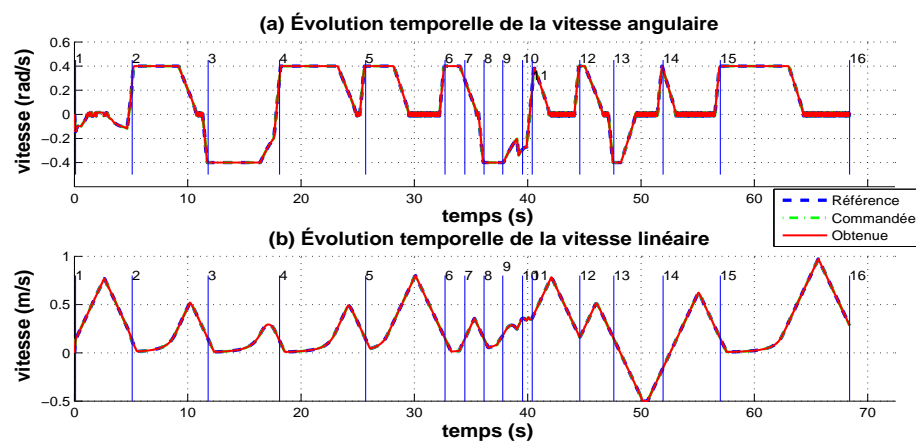


Figure 3.22 Vitesses obtenues avec compensation dynamique, supposant un délai $\tau = 0.5$ seconde.

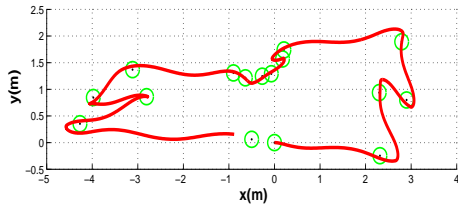


Figure 3.23 Chemin effectif obtenu sans compensation dynamique.

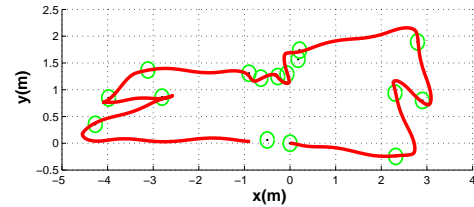


Figure 3.24 Chemin effectif obtenu avec compensation des pôles seulement.

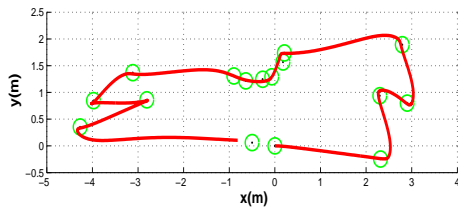


Figure 3.25 Chemin effectif obtenu avec compensation du délai seulement.

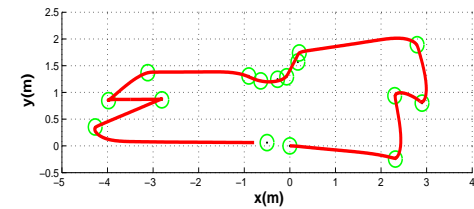


Figure 3.26 Chemin effectif obtenu avec compensation du délai et des pôles.

compensation dynamique cause une trajectoire directe et plus rapide d'une durée 102 secondes. La réduction des oscillations s'observe également dans l'évolution temporelle des vitesses linéaire et angulaire de la figure 3.29 à la figure 3.30. La compensation dynamique apparaît ici essentielle au bon fonctionnement du contrôleur de suivi de séquence de points et sera donc utilisée dans toutes les expérimentations subséquentes réalisées sur le FRM.

Suivi de trajectoires variées

En réalisant de nouveau les trajectoires des figures 3.8 et 3.10 sur le fauteuil réel et avec un écart de configuration relatif aux segments, on obtient, sur les figures 3.32 et 3.32, des trajectoires en somme plus rectilignes entre les points, causant par contre un parcours plus dentelé lorsque les

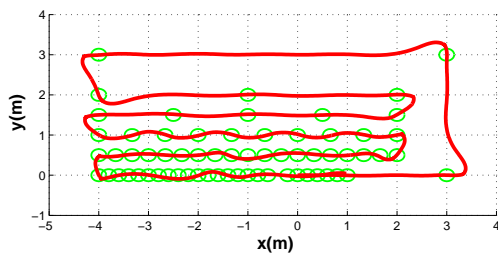


Figure 3.27 Suivi d'une séquence de points alignés, sans compensation dynamique et avec l'écart de configuration relatif aux segments.

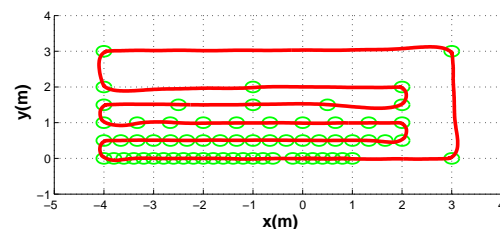


Figure 3.28 Suivi d'une séquence de points alignés, avec compensation dynamique et l'écart de configuration relatif aux segments.

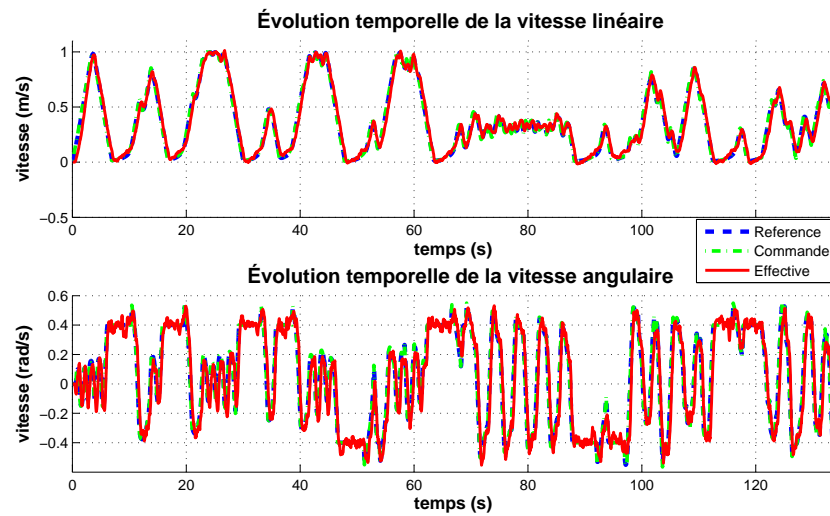


Figure 3.29 Vitesses relatives au suivi d'une séquence de points alignés par le FRM, sans compensation dynamique et avec l'écart de configuration relatif aux segments.

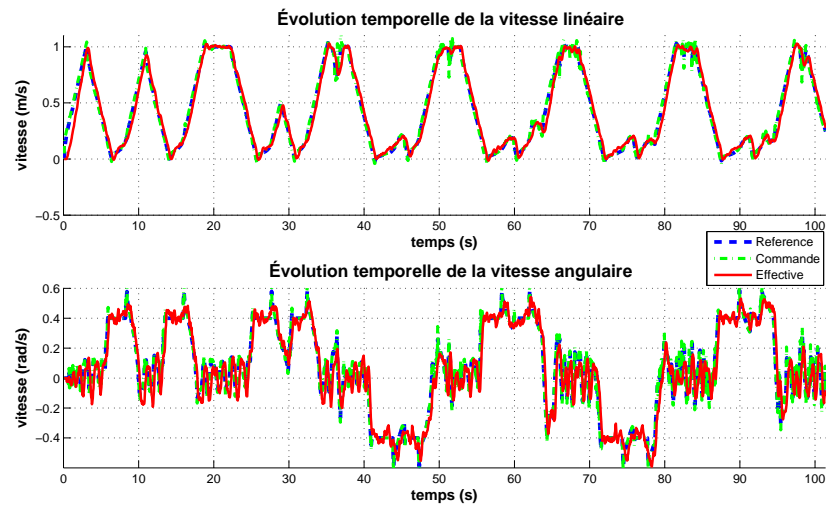


Figure 3.30 Vitesses relatives au suivi d'une séquence de points alignés par le FRM, avec compensation dynamique et l'écart de configuration relatif aux segments.

points rapprochés sont fortement désalignés, comme on l'observe vers le centre de la spirale.

Contrainte temporelle

Le tableau 3.6 présente les statistiques d'un parcours pour des contraintes de temps fixées à 50, 70 et 100 secondes. Pour chaque contrainte de temps, 10 tests sont effectués, à partir desquels est calculée la durée moyenne des parcours \bar{T} , l'erreur moyenne de leur durée ϵ^T , l'écart-type de leur durée σ^T , l'écart moyen entre les vitesses de référence et mesurées (en linéaire ϵ^{lin} et en angulaire ϵ^{ang}), la précision moyenne et la répétitivité. Les deux dernières mesures sont définies comme suit :

$$\text{précision} = (1 - \epsilon^T / T_d) \cdot 100 \quad (3.26)$$

$$\text{répétitivité} = (1 - \sigma^T / \bar{T}) \cdot 100 \quad (3.27)$$

Au tableau 3.6, on remarque que la contrainte de temps de 50 secondes est atteinte avec une précision moyenne de 96.3%, celle de 70 secondes avec une précision moyenne de 97.3% et celle de 100 secondes avec une précision de 99.2%. Comme les paramètres de conduite sont ajustés une seule fois en *boucle ouverte*, une telle précision est directement liée à celle de la compensation et du contrôle dynamique, ce qui est confirmé par la valeur décroissante des erreurs ϵ^{lin} et ϵ^{ang} offrant une précision toujours plus grande pour les tests de 50 à 100 secondes. On remarque que les erreurs ϵ^{lin} et ϵ^{ang} sont excessivement faibles compte tenu de la dynamique assez lente du système, mais ne sont pas nulles comme pour le cas de la simulation. Ceci est dû à plusieurs facteurs dont : l'imprécision sur l'estimation des pôles dominants du système et sur l'estimation du délai, la présence de pôles du deuxième ordre non pris en considération, l'incapacité du système à respecter la consigne en boucle ouverte (biais en régime permanent) et la présence du bruit de mesure.

La répétitivité des expérimentations apparaît également très élevée avec des valeurs de 98.6%, 99.1% et 99.2% pour les contraintes de 50, 70 et 100 secondes. Cette répétitivité se confirme sur la figure 3.33 où les 10 trajectoires liées à chaque contrainte de temps apparaissent quasi-superposées. Elle est toutefois favorisée par le fait : que la plate-forme était surélevée lors des tests, retirant un aspect aléatoire lié aux irrégularités du sol, et que les tests ont été réalisés sur une courte période de temps causant peu de variation de la réponse dynamique d'un test à l'autre¹³. D'autre part, bien que les trajectoires produites par chaque profil de conduite aient un style bien distinctif (comme il a été démontré par le suivi du mot *BONJOUR*), la grande répétitivité de l'exécution rend néanmoins le comportement cinématique très prévisible pour un profil donné. Ces tests démontrent que notre approche permet de respecter des contraintes de temps précisément avec un comportement stable et prévisible.

¹³Sur une longue période et au sol, la répétitivité pourrait diminuer par la fluctuation de divers paramètres affectant la réponse dynamique, tels que l'état des batteries, le poids de l'usager, l'état du sol et des pneus.

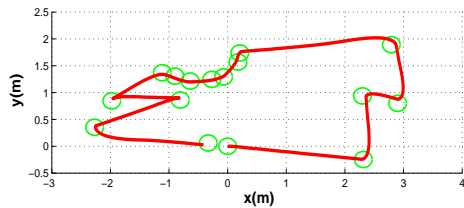


Figure 3.31 Suivi d'une trajectoire avec écart relatif aux segments sur le FRM.

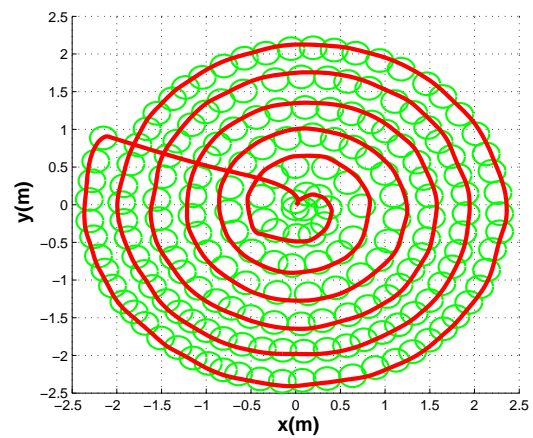


Figure 3.32 Suivi d'une trajectoire spirale avec écart relatif aux segments sur le FRM.

Tableau 3.6 Statistiques des 10 parcours obtenus pour chaque contrainte de temps imposée.

| T_d | ε^T | \bar{T} | σ^T | ε^{lin} | ε^{ang} | précision | répétitivité |
|-------|-----------------|-----------|------------|---------------------|---------------------|-----------|--------------|
| s | s | s | s | m/s | rad/s | (%) | (%) |
| 50 | 1.84 | 51.84 | 0.71 | 0.030 | 0.028 | 96.3 | 98.6 |
| 70 | 1.86 | 68.14 | 0.63 | 0.020 | 0.027 | 97.3 | 99.1 |
| 100.0 | 0.84 | 99.40 | 0.82 | 0.014 | 0.027 | 99.2 | 99.2 |

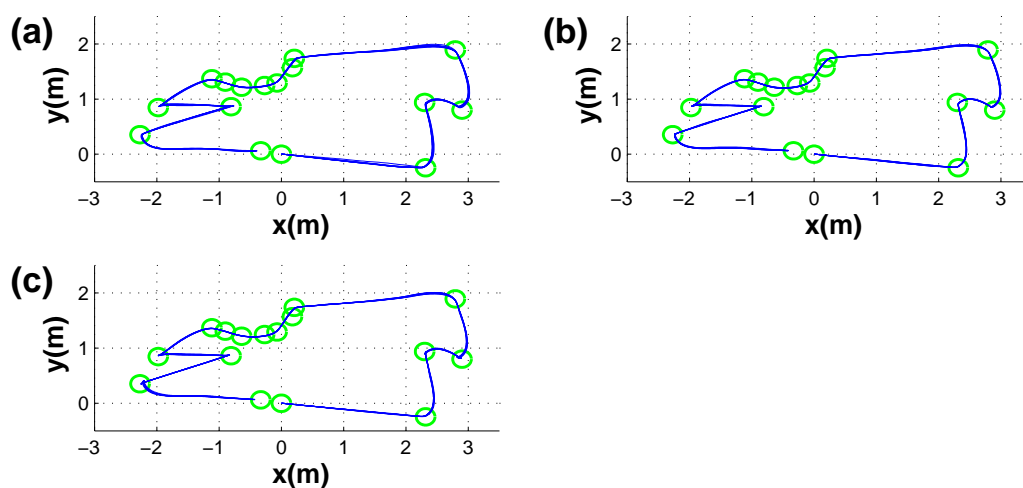


Figure 3.33 Dix trajectoires obtenues pour chaque contrainte de temps (a) 50, (b) 70 et (c) 100 secondes.

3.9 Conclusion

Ce chapitre a introduit une nouvelle approche permettant de contrôler une plate-forme mobile de manière à s'assurer qu'elle suive une séquence de points de passage avec une précision spécifiée. La considération directe des comportements de conduite dans la formulation mathématique assure leur respect et permet une navigation fluide et efficace se reflétant dans la forme du parcours. Les conditions garantissant le succès du suivi ont été démontrées, ainsi que la possibilité d'atteindre des contraintes temporelles et de compenser efficacement les délais et les pôles liés à la réponse dynamique. Soulignons que ce contrôleur de suivi de séquence de points fournira les lois de commande à la base du mouvement du fauteuil roulant semi-autonome, lesquelles seront ainsi utilisées dans les méthodes de stationnement, de suivi de mur, de traversée de passages étroits et de suivi de personnes.

CHAPITRE 4

RÉACTION AUX OBSTACLES : ASSISTANCE STRATÉGIQUE POUR LA NAVIGATION D'UNE PLATE-FORME MOBILE EN LIEUX ENCOMBRÉS

4.1 Introduction

En environnements intérieurs, une plate-forme mobile autonome doit couramment naviguer à proximité des obstacles. Or, une navigation efficace en lieux encombrés exige à la fois la capacité de choisir des vitesses d'approche sécuritaires et des déplacements admissibles cohérents aux objectifs de la manoeuvre en cours d'exécution.

De manière générale, les stratégies d'évitement de collision et d'obstacle dépendent de la configuration des obstacles environnants. Elles comprennent par exemple des techniques basées sur des champs de force où les objets repoussent la plate-forme (Borenstein et Koren, 1991), (An et Wang, 2004), (Wang et Chirikjian, 2000), (Ge et Cui, 2000), sur une planification de déplacements dans l'espace de configuration (Barraquand et Latombe, 1989), (Latombe, 1991) (Laumond *et al.*, 1994), (Ferbach, 1998), par optimisation où les mouvements orientés vers les obstacles sont pénalisés (Borenstein et Koren, 1990), (Ulrich et Borenstein, 1998) ou sur une structure contexte-action. Dans ce dernier cas, l'espace de configuration est divisé en contextes types correspondant chacun à une action spécifique. Un contexte type doit donc être reconnu dans l'environnement courant afin de sélectionner l'action appropriée. En pratique, le contexte réel se situera presque toujours entre plusieurs contextes types et l'action résultera ainsi d'une combinaison des actions requises pour chacun d'eux. Les structures établissant la relation entre le contexte détecté et l'action conséquente comprennent notamment des règles floues (Goodridge *et al.*, 1996), (Ishikawa, 1991), des réseaux de neurones multicouches (Reignier *et al.*, 1995), des réseaux de neurones flous (*neural fuzzy system*) (Song et Sheen, 2000), (Wang *et al.*, 2007a), (Ye *et al.*, 2003), (Hui et Pratihari, 2008) et des arbres de décision binaires (Minguez et Montano, 2005). Les vitesses requises pour chaque contexte peuvent être ajustées empiriquement par les concepteurs (Wang *et al.*, 2007b), (Wang *et al.*, 2007a) et obtenues par apprentissage automatique (Mahadevan et Connell, 1992), (Reignier *et al.*, 1995), (Shah Hamzei *et al.*, 1999), (Hui et Pratihari, 2008), (Ye *et al.*, 2003).

Les réactions d'évitement de collision et d'obstacle peuvent ensuite être intégrées à des fonctionnalités évoluées de manière continue via une logique floue (Yang *et al.*, 2006), (Wang et Liu, 2008), (Motlagh *et al.*, 2009), intervenir ponctuellement au besoin ou être conçues aux fins de manoeuvres spécifiques, telles que le suivi de trajectoires et l'atteinte de destinations (Minguez et Montano, 2005), (Kunchev *et al.*, 2006), les opérations de stationnements (Paromtchik *et al.*,

1996), (Baturone *et al.*, 2004), (Demirli et Khoshnejad, 2009), l'exploration réactive (Wang *et al.*, 2008) ou l'assistance d'un pilote humain via des techniques de contrôle collaboratif (Simpson et Levine, 1997), (Demeester *et al.*, 2003), (Horiguchi et Sawaragi, 2005), (Bruemmer *et al.*, 2005), (Urdiales *et al.*, 2008), (Trieu *et al.*, 2008), (Fernandez-Carmona *et al.*, 2009). Toutefois, pour les applications nécessitant la réalisation de tâches variées, comme l'application de fauteuil roulant autonome, le fait d'incorporer tous les comportements d'évitement de collision dans chaque tâche spécifique augmente les efforts de développement. Afin de réduire ces efforts, certains comportements d'évitement de collision peuvent être réunis dans un module plus général à la base de l'exécution de plusieurs tâches. Dans cette optique, (Minguez *et al.*, 2006) propose une approche permettant d'identifier les contraintes de mouvements induites par la présence d'obstacles, considérant une discrétisation 2D du périmètre de la plate-forme. La commande proposée par le module responsable de la manoeuvre est atténuée selon une décélération cible vers les obstacles. Cette approche nécessite toutefois l'évaluation de l'ensemble des possibilités de mouvement liées à chaque point d'occupation de la carte, ce qui apparaît lourd en calculs pour des applications temps-réel effectuées en environnement dynamique.

En réagissant presque uniquement en fonction de l'environnement, le problème fondamental des approches d'évitement d'obstacle recensées réside dans le fait qu'elles considèrent peu d'objectifs liés à la manoeuvre courante et peuvent donc générer des réactions qui lui sont contradictoires. En effet, typiquement, seul l'objectif d'atteindre une cible influence le choix de la réaction. Cette problématique est particulièrement relevée lorsque l'assistance doit convenir à des tâches variées, telles qu'effectuées par un usager de fauteuil roulant motorisé. Dans ce cas, la solution souvent retenue consiste à utiliser simultanément la commande maîtresse (générée pour la manoeuvre) et d'assistance (celle relative à l'évitement de collision) en pondérant chacune d'elles en fonction de l'*habilité* respective du maître et de l'assistant (Horiguchi et Sawaragi, 2005), (Urdiales *et al.*, 2008), (Fernandez-Carmona *et al.*, 2009). Si cette approche diminue l'impact des mouvements compétitifs de l'assistant, elle ajoute un problème : en diminuant le poids de l'assistant lors de l'approche d'obstacle, le ralentissement progressif et la sécurité n'est plus garantie. De plus, la présence de l'assistant dans le contrôle, à un degré variable, provoque toujours des mouvements compétitifs qui peuvent s'avérer difficiles à prédire (Horiguchi et Sawaragi, 2005), (Bruemmer *et al.*, 2005). Pour éviter ces problèmes, pour des questions de simplicité et d'efficacité, il s'avérerait donc intéressant d'avoir un assistant opérant de manière cohérente avec le maître.

Afin de garantir une navigation fluide (ralentissement progressif vers les obstacles), sécuritaire et cohérente avec les objectifs de la manoeuvre, nous proposons un assistant *stratégique* qui s'assure que les vitesses d'approche soient sécuritaires et qui comprend une fonctionnalité de *déblocage* où la réaction aux obstacles dépend de la stratégie et des objectifs du maître. Son efficacité repose sur une considération précise de la géométrie de la plate-forme et d'un ensemble d'objectifs déter-

minants à la base de l'exécution de la manoeuvre, comprenant des objectifs liés au mouvement, au transfert spatial et à l'évitement de collision.

Le chapitre est subdivisé comme suit. L'exposé du problème est présenté à la section suivante 4.2. Les objectifs de manoeuvre sont introduits à la section 4.3. La section 4.4 décrit le module d'assistance d'évitement de collision et la section 4.5 présente des résultats expérimentaux.

4.2 Exposé du problème

L'objectif est de réaliser un module général d'assistance à l'évitement de collision permettant aux modules assistés d'opérer facilement en lieux encombrés et sur des plates-formes de géométries variées. Pour une navigation sécuritaire, les vitesses commandées doivent diminuer selon la proximité des obstacles. Lorsque l'atténuation de la commande du module maître, nommée *commande maîtresse*, n'est plus possible sans provoquer l'immobilisation de la plate-forme, une commande alternative doit être choisie et appliquée.

La stratégie alternative est choisie, parmi un ensemble de candidates, de manière à respecter au mieux la *stratégie maîtresse*, ce qui implique d'ailleurs de bien considérer les objectifs à la source de la *commande*. Parfois, l'objectif de la commande maîtresse est simplement d'exécuter un mouvement comme pivoter à droite, à gauche, avancer ou reculer. Dans d'autres cas, l'objectif est de se rendre à un endroit de l'environnement, donc d'exécuter un transfert spatial. L'objectif peut aussi être de s'éloigner des obstacles afin de prévenir les collisions. Dans la majorité des cas, ces objectifs sont tous présents à différents degrés d'importance dans la réalisation de la tâche. La manière de considérer simultanément tous ces objectifs compétitifs dans le choix d'une stratégie alternative définit le coeur du module général de déblocage.

Nous supposons que la plate-forme a une contrainte non holonome selon l'axe de ses roues arrière. Le référentiel du robot est centré de telle sorte que l'axe des x pointe vers l'avant du mobile et l'axe des y soit superposé sur l'axe de la contrainte non holonome.

4.3 Objectifs de manoeuvres

Nous identifions ici d'importants aspects à prendre en considération pour la fonctionnalité de déblocage. La table 4.1 résume tous les objectifs identifiés, lesquels sont subdivisés en trois groupes selon qu'ils réfèrent à un mouvement, à un transfert spatial ou à un évitement de collision.

Les objectifs liés au mouvement incluent N^{LIN} le respect de la vitesse linéaire, N^{ANG} le respect de la vitesse angulaire et N^{MOV} le respect de la direction du mouvement résultant de leur combinaison. Les objectifs liés au transfert spatial incluent N^{APP} le besoin d'approcher une position de l'espace et N^{DIR} le besoin de s'orienter vers cette position.

La meilleure direction par laquelle un obstacle devrait être contourné dépend normalement de la manoeuvre en cours. Par exemple, traverser une porte exige de contourner le cadre de gauche par sa droite et le cadre de droite par sa gauche. Ceci implique un objectif N^{CNT} de tactique de contournement variant en temps réel selon une direction préférentielle. Dans certains cas, le contournement peut être exécuté des deux côtés indistinctement. Il demeure ainsi essentiel de privilégier les mouvements vers des régions dégagées d'obstacle N^{OFM} .

Les priorités, présentées à la deuxième colonne du tableau 4.1, définissent le poids relatif accordé à chaque objectif.

4.4 Module d'assistance à l'évitement de collision

Cette section décrit d'abord l'architecture de contrôle locale dans laquelle s'imbrique le module d'assistance à l'évitement de collision. L'architecture du module d'assistance est ensuite présentée, suivie de la méthode pour calculer les distances libres et du fonctionnement du système de déblocage.

4.4.1 Architecture de contrôle utilisant le module d'assistance

L'assistance à l'évitement de collision opère dans une architecture de contrôle présentée à la figure 4.1. Le module maître vise la réalisation de tâches variées, telles que le passage de portes, le stationnement, le suivi d'une trajectoire ou d'une séquence de points de passage, etc.

Le module d'assistance stratégique produit une commande en vitesse $\{v_k^R, \omega_k^R\}$ variant selon la pose courante de la plate-forme, des points d'occupation de l'environnement, du périmètre précis de la plate-forme et de la stratégie maîtresse. Le module d'assistance transmet au maître les contraintes de mouvement afin que ce dernier puisse adapter son comportement si nécessaire. La commande de référence du module d'assistance est acheminée à un contrôleur dynamique qui compense l'écart avec les vitesses réelles par une rétroaction en boucle fermée.

Tableau 4.1 Objectifs généraux des manoeuvres

| <i>Objectif</i> | <i>Poids</i> | <i>Description</i> |
|-----------------|----------------|---|
| N^{LIN} | γ^{LIN} | Respect de la vitesse linéaire |
| N^{ANG} | γ^{ANG} | Respect de la vitesse angulaire |
| N^{MOV} | γ^{MOV} | Respect de la direction du mouvement |
| N^{DIR} | γ^{DIR} | Pointer vers une position |
| N^{APP} | γ^{APP} | S'approcher d'une position |
| N^{CNT} | γ^{CNT} | Respect de la tactique de contournement |
| N^{OFM} | γ^{OFM} | Recherche d'un mouvement vers des zones dégagées d'obstacle |

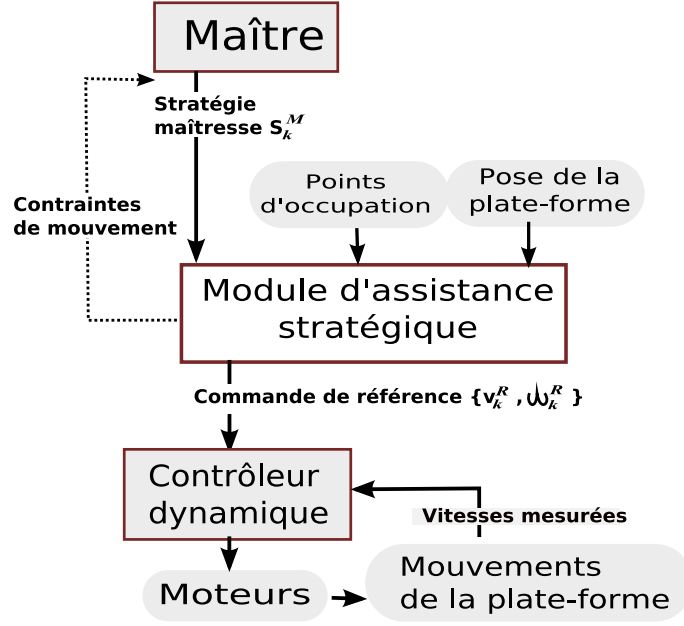


Figure 4.1 Architecture de contrôle locale utilisant le module d'assistance stratégique à l'évitement de collision.

La commande de l'assistant respecte les contraintes cinématiques suivantes : la décélération a_{max}^{obs} d'approche des obstacles, les vitesses linéaire et angulaire maximales des stratégies alternatives $\{v^{strat}, \omega^{strat}\}$ et leurs limites d'accélération correspondantes $\{a_{min}, a_{max}, \alpha_{min}, \alpha_{max}\}$.

4.4.2 Architecture du module d'assistance à l'évitement de collision

L'architecture du module d'assistance stratégique est présentée à la figure 4.2. Ce système sélectionne la meilleure stratégie parmi $n^{(s)}$ possibilités, $\{S^{(w)}, w = 1, \dots, n^{(s)}\}$, dès que le mouvement induit par la stratégie maîtresse S_k^M ne peut être exécuté de façon sécuritaire.

Une stratégie S , définie comme suit, constitue un plan de déplacement instantané :

$$S = \{v, \omega, w, T\},$$

où v est une vitesse linéaire, ω une vitesse angulaire, w la position à atteindre associée à l'objectif de transfert spatial et $T = \{horaire, antihoraire, nulle\}$ une direction préférentielle de contournement liée à l'objectif d'évitement de collision. Une stratégie est jugée *admissible* si elle induit un mouvement comportant une distance libre (d'obstacle) supérieure à une distance minimale κ .

La stratégie maîtresse à une étape k est :

$$\{S_k^M, \eta_k^M\},$$

où $\eta_k^M = \{\text{actif}, \text{inactif}\}$ indique si le mode de déblocage est activé ou non¹.

À chaque étape, la distance libre d'obstacle τ_k^M de la stratégie maîtresse est évaluée. Lorsqu'elle n'est pas admissible ($\tau_k^M < \kappa$), une stratégie alternative est sélectionnée parmi les $n^{(s)}$ candidates. Les distances libres des candidates sont alors évaluées, soit $\{\tau_k^{(w)}, w = 1, \dots, n^{(s)}\}$. Les candidates admissibles, respectant $\tau_k^{(w)} \geq \kappa$, sont retenues pour former l'ensemble Φ_k , lequel comporte n^{Φ_k} stratégies. La stratégie optimale S_k^* (appartenant à Φ_k) qui minimise l'écart avec les objectifs de la manoeuvre est alors choisie (voir la section 4.4.4). L'amplitude de la commande retenue est finalement réduite si nécessaire pour garantir une navigation sécuritaire (section 4.4.6).

4.4.3 Évaluation des distances libres de collision

Cette section décrit comment calculer la distance libre de collision associée à une stratégie donnée. L'évaluation suppose que la commande maîtresse est constante dans le temps (hypothèse de pérennité de la commande), comme dans le cas de Minguez *et al.* (2006). Cependant, notre approche ne nécessite pas l'évaluation des trajectoires réalisables associées à chaque point d'occupation. En fait, nous procédons d'une façon différente en considérant directement la trajectoire du périmètre de la plate-forme induite par la stratégie afin de sélectionner les points d'occupation limitant son mouvement. De plus, nous ajoutons un coefficient d'incertitude lié à l'hypothèse de la pérennité de la commande, laquelle ne s'avère pas réaliste en pratique à cause des variations de la commande maîtresse et de l'imprécision de la réponse dynamique.

Les points d'occupation, $Q = \{q_j, j = 1, \dots, n^{(Q)}\}$ avec $q_j = [q_{jx}, q_{jy}]'$, peuvent être directement extraits des mesures sensorielles (en provenance de télémètres, sonars, infrarouges, etc.) ou obtenus sur une cartographie dynamique². La distance minimale de séparation des points d'occupation est de Δq^{\min} , laquelle peut correspondre à la résolution d'une carte. L'ensemble des points de contour $C = \{c_i, i = 1, \dots, n^{(C)}\}$ est obtenu par discrétisation du périmètre de la plate-forme. Les points sont tous exprimés dans le référentiel du robot.

¹Notez que l'inactivation du déblocage ($\eta_k^M = \text{inactif}$) permet la fonctionnalité d'amarrage

²Remarquez que la seconde option est particulièrement pratique lorsque les capteurs ne détectent pas bien tous les obstacles environnants.

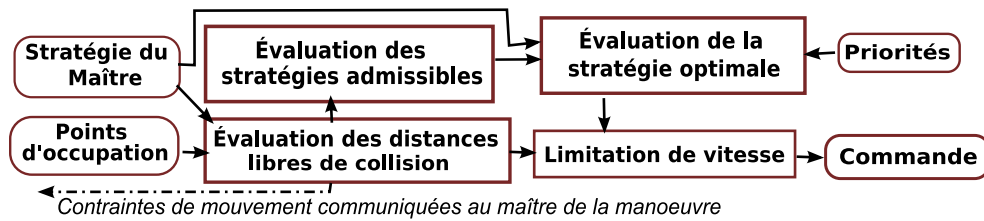


Figure 4.2 Architecture du module d'assistance stratégique à l'évitement de collision.

Distance libre de collision pour une vitesse angulaire non nulle

La figure 4.3 illustre l'ensemble des paramètres impliqués dans les développements ci-dessous. Pour une commande $\{v, \omega\}$ dont la vitesse angulaire est non nulle ($\omega \neq 0$), la vitesse de chaque point de contour c_i aura comme composante :

$$\begin{bmatrix} v_{xi} \\ v_{yi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v - c_{iy}\omega \\ c_{ix}\omega \end{bmatrix}, \quad (4.1)$$

et sera d'amplitude :

$$v_i = \sqrt{v_{xi}^2 + v_{yi}^2} \quad (4.2)$$

La trajectoire t_i du point de contour aura ainsi un rayon de courbure donné par :

$$r_i = v_i / |\omega|. \quad (4.3)$$

Étant donné la contrainte non-holonome, l'origine O_i de la trajectoire circulaire t_i est sur l'axe des y ($O_{ix} = 0$). La coordonnée y de l'origine est donnée par la relation suivante :

$$O_{iy} = \begin{cases} c_{iy} + \text{sign}(v\omega) \sqrt{r_i^2 - c_{ix}^2} & v \neq 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}. \quad (4.4)$$

La distance de séparation $a_{i,j}$ entre l'origine O_i et le point d'occupation q_j correspond à :

$$a_{i,j} = \sqrt{q_{jx}^2 + (q_{jy} - O_{iy})^2}. \quad (4.5)$$

La distance transversale $b_{i,j}$ entre la trajectoire t_i et le point d'occupation q_j est alors :

$$b_{i,j} = |r_i - a_{i,j}|. \quad (4.6)$$

Par rapport à l'origine O_i , l'angle entre le point de contour c_i et le point d'occupation q_j est donné par :

$$\theta_{i,j} = \begin{cases} \Gamma(\text{atan2}(q_{iy} - O_{iy}, q_{ix}) - \text{atan2}(c_{iy} - O_{iy}, c_{ix}), 0, 2\pi) & \omega \geq 0 \\ \Gamma(\text{atan2}(q_{iy} - O_{iy}, q_{ix}) - \text{atan2}(c_{iy} - O_{iy}, c_{ix}), -2\pi, 0) & \text{sinon} \end{cases}, \quad (4.7)$$

où $\Gamma(\alpha, \theta_{min}, \theta_{max})$ est une fonction qui retourne l'angle α exprimé entre θ_{min} et θ_{max} .

La distance longitudinale séparant le point de contour c_i du point d'occupation q_j est :

$$s_{i,j} = |\theta_{i,j}| * r_i. \quad (4.8)$$

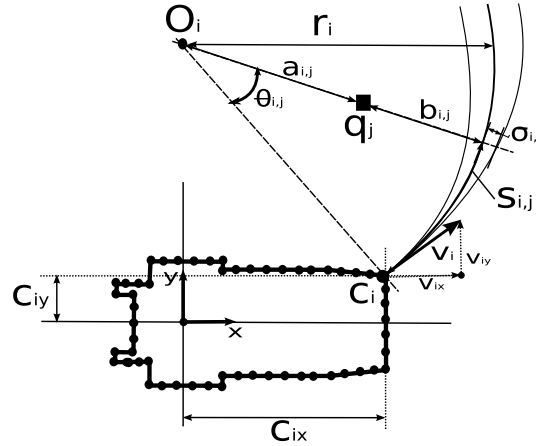


Figure 4.3 Paramètres utiles au calcul d'une distance libre de collision d'un point de contour c_i , pour une vitesse angulaire non nulle.

En raison de la discrétisation du périmètre et l'hypothèse de la pérennité de la commande, la largeur de la zone d'incertitude, nommée $\sigma_{i,j}$, augmente avec la distance longitudinale $s_{i,j}$ comme suit :

$$\sigma_{i,j} = \Delta q^{\min} / 2 + \varepsilon * s_{i,j} \quad (4.9)$$

où ε ajuste l'augmentation d'incertitude liée à l'accroissement de la distance longitudinale. Nous considérons que le point d'occupation q_j est sur la trajectoire t_i si sa distance de séparation transversale $b_{i,j}$ est en deçà de la largeur de la zone d'incertitude $\sigma_{i,j}$. En supposant que $\chi_i = \{s_{i,x}, x = 1, \dots, L\}$ correspond à un ensemble de distances longitudinales issues de points compris sur la trajectoire t_i , nous avons :

$$s_{i,j} \in \chi_i \text{ si } b_{i,j} < \sigma_{i,j} \quad \forall j = 1, \dots, n^{(Q)}. \quad (4.10)$$

La distance libre de collision pour le point de contour c_i sera :

$$\tau_i = \begin{cases} \min \{s_{i,x}\}_{x=1, \dots, L} & L > 0 \\ \infty & \text{sinon} \end{cases} \quad (4.11)$$

En répétant cette procédure pour chaque point de contour, la distance libre de collision de la commande $\{v, \omega\}$ est donnée par :

$$\tau = \min_{i=1, \dots, n} \tau_i. \quad (4.12)$$

Ce résultat reste identique pour toutes combinaisons $\{v', \omega'\}$ induisant des trajectoires identiques, lesquelles respectent $\{v', \omega'\} = K\{v, \omega\}$ avec $K \in \mathfrak{R}$.

Distance libre de collision pour une vitesse angulaire nulle

La solution est légèrement plus simple si la vitesse angulaire est nulle. Dans ce cas, la distance entre un point d'occupation q_j et la trajectoire t_i d'un point de contour c_i est donnée par :

$$b_{i,j} = \begin{cases} |q_{iy} - c_{iy}| & \text{si } \text{sign}(q_{jx} - c_{ix}) = \text{sign}(v) \\ \infty & \text{sinon} \end{cases} \quad (4.13)$$

La distance de séparation entre le point de contour c_i et le point d'occupation q_j sera donc :

$$s_{i,j} = |q_{jx} - c_{ix}|. \quad (4.14)$$

Les étapes subséquentes sont identiques au cas où la vitesse angulaire est non-nulle (voir les équations (4.10) à (4.12)).

4.4.4 Choix de la stratégie optimale

Le système de déblocage stratégique comporte deux modes d'opération ordonnés selon la machine à état représentée à la figure 4.4, soient le mode *permissif* et le mode *débloquant*. Le mode *permissif* est activé lorsque la stratégie maître S_k^M est admissible ou que le déblocage est inactif ($\eta_k^M = \text{inactif}$). Dans ce mode, la stratégie optimale à l'étape k correspond à celle du maître ($S_k^* = S_k^M$). Si la stratégie maîtresse n'est pas admissible et que le déblocage est activé ($\eta_k^M = \text{actif}$), alors le mode *débloquant* opère. Une stratégie alternative est alors obtenue en minimisant une fonction de coût.

Le coût entre une stratégie candidate $S_k^{(z)}$ et une stratégie cible S_k^D est donné par :

$$\begin{aligned} C(S_k^{(z)}, S_k^D) &= C^{\text{mouv}}(S_k^{(z)}, S_k^D) + C^{\text{dep}}(S_k^{(z)}, S_k^D) \\ &\quad + C^{\text{obs}}(S_k^{(z)}, S_k^D), \end{aligned} \quad (4.15)$$

où C^{mouv} est le coût lié au mouvement, C^{dep} au transfert spatial et C^{obs} à l'évitement d'obstacle.

Ces coûts sont calculés comme suit :

$$C^{mouv}(S_k^{(z)}, S_k^D) = \gamma^{LIN} \Delta N^{LIN}(S_k^{(z)}, S_k^D) + \gamma^{ANG} \Delta N^{ANG}(S_k^{(z)}, S_k^D) + \gamma^{MOV} \Delta N^{MOV}(S_k^{(z)}, S_k^D); \quad (4.16)$$

$$C^{dep}(S_k^{(z)}, S_k^D) = \gamma^{DIR} \Delta N^{DIR}(S_k^{(z)}, S_k^D) + \gamma^{APP} \Delta N^{APP}(S_k^{(z)}, S_k^D); \quad (4.17)$$

$$C^{obs}(S_k^{(z)}, S_k^D) = \gamma^{CNT} \Delta N^{CNT}(S_k^{(z)}, S_k^D) + \gamma^{OFM} \Delta N^{OFM}(S_k^{(z)}), \quad (4.18)$$

où $\Delta N^X(S_k^{(z)}, S_k^D)$ est l'écart entre la stratégie $S_k^{(z)}$ et la stratégie S_k^D concernant l'objectif N^X .

À chaque instant, deux stratégies sont simultanément ciblées : la stratégie du maître S_k^M et la stratégie précédemment appliquée S_{k-1}^* . Le paramètre λ^{ASS} , compris entre $[0, 1]$, définit la concentration de l'assistant, soit le poids relatif entre la stratégie précédente S_{k-1}^* et maîtresse S_k^M . Si une valeur élevée de λ^{ASS} risque de provoquer une réaction peu adaptée aux nouvelles commandes du maître (l'assistant est alors trop *concentré* à réussir l'action entamée lors de l'initiation du déblocage), une valeur trop basse peut engendrer un manque de cohérence de l'assistant (qui, étant trop *attentif* aux variations des commandes maîtresses, manque alors de *concentration*). Le coût de chaque stratégie $S_k^{(z)}$ sera ainsi :

$$C^{AD}(S_k^{(z)}, S_k^M, S_{k-1}^*) = C(S_k^{(z)}, S_k^M) \cdot (1 - \lambda^{ASS}) + C(S_k^{(z)}, S_{k-1}^*) \cdot \lambda^{ASS}, \quad (4.19)$$

La section suivante explique comment sont calculés les écarts d'objectifs.

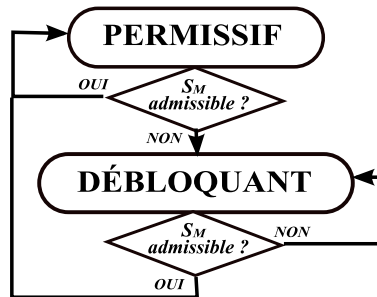


Figure 4.4 Machine à états du système de déblocage stratégique.

4.4.5 Calcul des écarts d'objectif

L'écart par rapport à un objectif doit être d'autant plus élevé que la stratégie candidate ne le respecte pas. Toutefois, il importe que l'écart de chaque objectif soit borné, et par des bornes de valeurs égales à celles des objectifs concurrents, afin que leur contribution au coût total reflète leur importance relative. Nous choisissons de borner les écarts d'objectifs entre zéros et un :

$$\Delta N^X \in [0, 1], \forall X.$$

Le calcul des écarts d'objectifs, résumé à la table 4.2, est décrit ci-dessous.

Écarts relatifs au mouvement

L'écart de mouvement est en terme de vitesse linéaire et angulaire, puis en terme de direction instantanée. L'écart entre deux vitesses augmente avec leur différence d'amplitude. Les écarts linéaire ΔN^{LIN} et angulaire ΔN^{ANG} sont ainsi :

$$\Delta N^{LIN}(S_k^{(z)}, S_k^D) = 1 - e^{-\beta^{LIN} |v_k^D - v_k^{(z)}|} \quad (4.20)$$

$$\Delta N^{ANG}(S_k^{(z)}, S_k^D) = 1 - e^{-\beta^{ANG} |\omega_k^D - \omega_k^{(z)}|}, \quad (4.21)$$

où β^{LIN} et β^{ANG} ajustent l'impact de l'écart de vitesse sur le coût (fixés à 1 dans nos expériences).

La direction du mouvement dépend de la combinaison des vitesses linéaire et angulaire. Le coût lié à la direction du mouvement est :

$$\Delta N^{MOV}(S_k^{(z)}, S_k^D) = \left| \Gamma \left(\text{atan2}(\omega_k^D, v_k^D) - \text{atan2}(\omega_k^{(z)}, v_k^{(z)}), -\pi, \pi \right) / \pi \right|^{\lambda^{MOV}}, \quad (4.22)$$

où λ^{MOV} est la tolérance de rejet du candidat selon le respect de la direction du mouvement. Si la tolérance de rejet λ^{MOV} est très élevée, l'écart de direction du mouvement sera, à la limite, non nul seulement pour le mouvement parfaitement *antagoniste*. Un mouvement *antagoniste* détruit parfaitement l'effet du mouvement désiré. Par exemple, avancer et reculer ou tourner à droite et tourner à gauche constituent des mouvements parfaitement antagonistes. Annulant mutuellement leurs effets, l'application consécutive de mouvements antagonistes bloque l'évolution de la plateforme. Pour cette raison, le respect de la direction du mouvement est sans aucun doute un des objectifs devant avoir le plus de poids dans le choix de la stratégie alternative.

Écarts relatifs au transfert spatial

Le besoin de transfert implique que la plate-forme se rapproche de la cible w et qu'elle s'oriente selon cette cible. S'orienter vers la cible peut nécessiter de s'en éloigner temporairement comme pour la circonstance illustrée à la figure 4.5 où la stratégie $S^{(1)}$ apparaît préférable à $S^{(2)}$ bien qu'elle produise un éloignement supérieur. Pour l'objectif d'orientation, l'écart d'une stratégie $S_k^{(z)}$ dépend simplement du signe de la vitesse angulaire. Il est unitaire si la vitesse angulaire augmente l'écart angulaire ϕ_k avec la cible w et nul autrement :

$$\Delta N^{DIR}(S_k^{(z)}, S_k^D) = \quad (4.23)$$

$$\begin{cases} 0 & (\omega_k^{(z)} = 0 \text{ et } \phi_k = 0) \text{ ou } (\text{sign}(\omega_k^{(z)}) = \text{sign}(\phi_k)) \\ 1 & \text{sinon} \end{cases} \quad (4.24)$$

L'écart de rapprochement d'une candidate $S_k^{(z)}$ dépend de la distance $b_w^{(z)}$ entre la cible w et la trajectoire de la plate-forme imposée par les vitesses $v_k^{(z)}$ et $\omega_k^{(z)}$. Le calcul de la distance $b_w^{(z)}$ entre la trajectoire du point de giration de la plate-forme et la cible w est identique à celui effectué à la section 4.4.3 entre la trajectoire d'un point de contour c_i et un obstacle q_j . L'écart de rapprochement s'exprime donc ainsi :

$$\Delta N^{APP}(S_k^{(z)}, S_k^D) = 1 - e^{-|b_w^{(z)}| \cdot \beta^{APP}} \quad (4.25)$$

où β^{APP} ajuste l'impact de la distance sur l'écart de rapprochement (fixé à 0.1 dans nos applications).

Pour l'exemple de la figure 4.5, la stratégie $S^{(2)}$ est préférable à $S^{(1)}$ pour l'objectif de rapprochement.

Écarts relatifs à l'évitement d'obstacles

Le respect d'une direction de contournement $T_D = \{\text{horaire}, \text{antihoraire}, \text{nulle}\}$ implique que la plate-forme pivote dans la direction désirée à l'approche d'un obstacle. On considère que cet objectif est d'autant plus respecté que la vitesse de rotation en cette direction est grande :

$$\Delta N^{CNT}(S_k^{(z)}, S_k^D) = \begin{cases} 0.5 \cdot e^{-\omega_k^{(z)} \cdot \beta^{CNT}} & (T_D = \text{antihoraire}) \text{ et } (\omega_k^{(z)} \geq 0) \\ 1 - 0.5 \cdot e^{\omega_k^{(z)} \cdot \beta^{CNT}} & (T_D = \text{antihoraire}) \text{ et } (\omega_k^{(z)} < 0) \\ 0.5 \cdot e^{\omega_k^{(z)} \cdot \beta^{CNT}} & (T_D = \text{horaire}) \text{ et } (\omega_k^{(z)} < 0) \\ 1 - 0.5 \cdot e^{-\omega_k^{(z)} \cdot \beta^{CNT}} & (T_D = \text{horaire}) \text{ et } (\omega_k^{(z)} \geq 0) \end{cases} \quad (4.26)$$

À la section 4.4.3, il a été présenté l'évaluation des distances libres de chaque point de contour $\{\tau_i^{(z)}, i = 1, \dots, n^{(C)}\}$ d'une stratégie $S_k^{(z)}$. Ceci permet de calculer un taux d'occupation p lié à

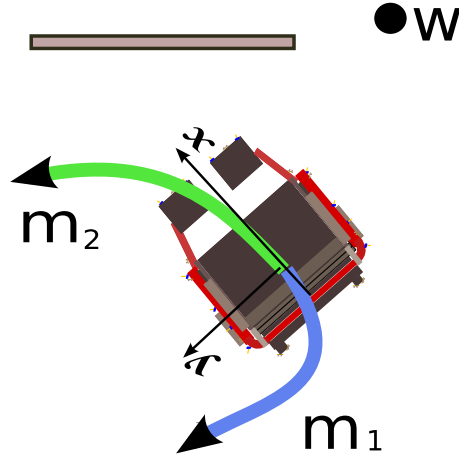


Figure 4.5 Comparaison de deux stratégies selon les besoins de transfert spatial. Concernant l'objectif d'orientation, $S^{(1)}$ apparaît préférable à $S^{(2)}$, tandis que pour le besoin de rapprochement, $S^{(2)}$ est préférable à $S^{(1)}$.

chaque stratégie :

$$\rho(S_k^{(z)}) = \sum_{i=1, \dots, n^{(C)}} \frac{1}{1 + \beta^{OFM}(\tau_i^{(z)})^2} \quad (4.27)$$

où β^{OFM} est un paramètre ajustant l'impact de la proximité entre un point d'occupation et le périmètre de la plate-forme. L'écart de recherche de zones libres d'une stratégie dépend de son taux d'occupation relatif au taux maximal observé :

$$\Delta N^{OFM}(S_k^{(z)}) = \frac{\rho(S_k^{(z)})}{\max\{\rho(S_k^{(x)})\} \Big|_{x=1, \dots, n^\Phi}} \quad (4.28)$$

Puisque cet écart ne dépend pas de la manoeuvre en cours, le poids accordé à la recherche d'une zone dégagée d'obstacle devrait rester assez faible afin d'éviter des réactions compétitives.

4.4.6 Limitation de la vitesse d'approche des obstacles

La section précédente permet la sélection d'une stratégie optimale comportant les vitesses $\{v_k^*, \omega_k^*\}$. En considérant les vitesses commandées à l'instant précédent $\{v_{(k-1)}^C, \omega_{(k-1)}^C\}$ et les limites d'accélération $\{a_m, a_p, \Omega_m, \Omega_p\}$, nous pouvons en déduire les vitesses de référence $\{v_k^{(p)}, \omega_k^{(p)}\}$, lesquelles doivent être atténuées si nécessaire pour garantir une navigation sécuritaire. Utilisant la technique de la section 4.4.3, nous trouvons la distance libre $\tau^{(D)}$ associée à cette commande, la-

Tableau 4.2 Calculs des écarts d'objectif

| <i>OBJECTIFS</i> | <i>FORMULE</i> |
|---|--|
| Vitesse linéaire | $\Delta N^{LIN}(S_k^{(z)}, S_k^D) = e^{-\beta^{LIN} v_k^D - v_k^{(z)} }$ |
| Vitesse angulaire | $\Delta N^{ANG}(S_k^{(z)}, S_k^D) = e^{-\beta^{ANG} \omega_k^D - \omega_k^{(z)} }$ |
| Direction du mouvement | $\Delta N^{MOV}(S_k^{(z)}, S_k^D) =$ $ \Gamma \left(atan2(\omega_k^D, v_k^D) - atan2(\omega_k^{(z)}, v_k^{(z)}) \right) / \pi ^{\lambda^{MOV}}$ |
| Approcher une position | $\Delta N^{APP}(S_k^{(z)}, S_k^D) = 1 - e^{- b_w^{(z)} \cdot \beta^{APP}}$ |
| S'orienter vers une position | $\Delta N^{DIR}(S_k^{(z)}, S_k^D) =$ $\begin{cases} 0 & (\omega_k^{(z)} = 0 \text{ et } \phi_k = 0) \text{ ou } (sign(\omega_k^{(z)}) = sign(\phi_k)) \\ 1 & \text{sinon} \end{cases}$ |
| Tactique de contournement | $\Delta N^{CNT}(S_k^{(z)}, S_k^D) =$ $\begin{cases} 0.5 \cdot e^{-\omega_k^{(z)} \cdot \beta^{CNT}} & (T_D = \text{antihoraire}) \text{ et } (\omega_k^{(z)} \geq 0) \\ 1 - 0.5 \cdot e^{\omega_k^{(z)} \cdot \beta^{CNT}} & (T_D = \text{antihoraire}) \text{ et } (\omega_k^{(z)} < 0) \\ 0.5 \cdot e^{\omega_k^{(z)} \cdot \beta^{CNT}} & (T_D = \text{horaire}) \text{ et } (\omega_k^{(z)} < 0) \\ 1 - 0.5 \cdot e^{-\omega_k^{(z)} \cdot \beta^{CNT}} & (T_D = \text{horaire}) \text{ et } (\omega_k^{(z)} \geq 0) \end{cases}$ |
| Recherche d'une zone dégagée d'obstacle | $\Delta N^{OFM}(S_k^{(z)}) = \frac{\rho(S_k^{(z)})}{\max\{\rho(S_k^{(x)})\}_{x=1, \dots, n\Phi}}$ |

quelle implique une vitesse maximale donnée par :

$$v_{max} = \sqrt{2 \cdot \tau^{(D)} * a_{max}^{obs}} \quad (4.29)$$

La commande en vitesse sera ainsi donnée par :

$$\{v_{(k)}^C, \omega_{(k)}^C\} = \begin{cases} \{v_k^{(p)}, \omega_k^{(p)}\} & \text{if } v_i \leq v_{max} \\ \{v_k^{(p)}, \omega_k^{(p)}\} \cdot K & \text{sinon} \end{cases} \quad (4.30)$$

où $K = v_{max}/v_i$. Cette dernière expression, analogue à celle utilisée par Minguez *et al.* (2006), maintient la direction du mouvement induit par les vitesses de référence $\{v_k^{(p)}, \omega_k^{(p)}\}$.

4.5 Résultats expérimentaux

Nous présentons à titre d'exemple l'assistance d'un passage de porte commandé de façon rudimentaire, suivi d'un contournement d'obstacle. Des exemples supplémentaires seront présentés pour l'assistance de stationnement au chapitre 7 et de traversée de passages étroits au chapitre 6. Huit stratégies alternatives, présentées à la table 4.3, ont été utilisées et correspondent aux directions logiques {avant, avant-gauche, gauche, arrière-gauche, arrière, arrière-droite, droite, avant-droite}.

4.5.1 Assistance d'un passage de porte

Cette expérience, réalisée en simulation pour faciliter la démonstration du concept, présente comment le module d'assistance stratégique peut assister un passage de porte commandé de façon rudimentaire. Les priorités sont tous définies constantes $\{\gamma^{LIN} = 1, \gamma^{ANG} = 1, \gamma^{MOV} = 5, \gamma^{DIR} =$

Tableau 4.3 Mouvements alternatifs utilisés dans le module d'assistance stratégique.

| Motion | Direction | v | ω |
|-----------|----------------|-------------------------|-------------------------------|
| $S^{(1)}$ | avant | $+v^{strat}$ | 0 |
| $S^{(2)}$ | avant-gauche | $+v^{strat} / \sqrt{2}$ | $+ \omega^{strat} / \sqrt{2}$ |
| $S^{(3)}$ | gauche | 0 | $+ \omega^{strat}$ |
| $S^{(4)}$ | arrière-gauche | $-v^{strat} / \sqrt{2}$ | $- \omega^{strat} / \sqrt{2}$ |
| $S^{(5)}$ | arrière | $-v^{strat}$ | 0 |
| $S^{(6)}$ | arrière-droite | $-v^{strat} / \sqrt{2}$ | $+ \omega^{strat} / \sqrt{2}$ |
| $S^{(7)}$ | droite | 0 | $- \omega^{strat}$ |
| $S^{(8)}$ | avant-droite | $+v^{strat} / \sqrt{2}$ | $- \omega^{strat} / \sqrt{2}$ |

$0.5, \gamma^{APP} = 0.5, \gamma^{CNT} = 1, \gamma^{OFM} = 0.3\}$. Pour défavoriser la sélection de stratégies pouvant mener à des blocages, le poids accordé à la direction du mouvement instantané est très élevé, tandis que celui accordé à la recherche de zones dégagées d'obstacle est particulièrement faible, puisqu'il s'agit de l'objectif le plus indépendant de la manoeuvre et donc le plus susceptible de créer des réactions nuisant à son évolution. La décélération cible vers les obstacles est ajustée à 0.03 m/s^2 afin d'assurer une navigation sécuritaire à l'approche des obstacles.

Les phases importantes du passage sont illustrées à la figure 4.6. Les cadrans supérieurs présentent les poids relatifs des stratégies alternatives $S^{(z)}, z = 1, \dots, n^\Phi$: plus le trait noir s'approche du périmètre du cadran, plus le poids de la stratégie correspondante est élevé. Une stratégie sans trait noir est donc inadmissible. La figure 4.7 présente l'évolution temporelle de la vitesse linéaire, angulaire et de la stratégie sélectionnée. La stratégie d'indice 0 correspond à celle du maître. L'assistance au déblocage est toujours activée $\eta^M = \text{actif}$ et il n'y a aucune direction préférentielle de contournement d'obstacle, d'où $T^M = \text{nulle}$.

La manoeuvre débute lorsque le maître commande une rotation vers la gauche à une vitesse de 0.6 rad/s avec une position préférentielle de transfert spatial située de l'autre côté de la porte, comme il est présenté à la figure 4.6 (a). Nous observons une réduction graduelle de la vitesse angulaire lors de l'approche de la porte, sur la figure 4.7, jusqu'à ce que la stratégie maîtresse devienne inadmissible. La stratégie $S^{(5)}$, effectuant un déplacement arrière, est alors sélectionnée (puisque'elle minimise le coût) à la phase (b) jusqu'à ce que la stratégie maîtresse redevienne admissible en (c). Lorsque la plate-forme devient assez bien orientée, le maître décide à la phase (d) d'avancer tout droit pour traverser la porte. Puisque la plate-forme est orientée vers le cadre de la porte, sa vitesse linéaire décroît graduellement jusqu'à l'atteinte du cadre. À la phase (e), la stratégie $S^{(8)}$ permet une progression avant-droite au travers le cadre. La plate-forme continue d'avancer tout droit dès que possible en (f), réalise un mouvement avant-gauche en (g), continue d'avancer en (h) en tournant aussi à droite en (i), poursuit de nouveau l'avancement en (j) pour ensuite tourner à gauche via $S^{(2)}$ en (k). Elle est finalement passée en (h).

Dans cet exemple, l'atténuation des vitesses permet une navigation sécuritaire et le mode débloquent intervient seulement lorsque nécessaire lors des phases (b), (e), (g), (i) et (k), visibles à la figure 4.7.

4.5.2 Assistance d'un suivi de mur, contournement d'un obstacle

Cet exemple présente une circonstance où l'interaction entre le maître et le module d'assistance produit un cycle de mouvements répétitifs ou un contournement d'obstacle, selon la valeur du coefficient de concentration.

À la figure 4.8 (a), le maître tente d'effectuer le suivi d'une droite parallèle au mur, laquelle est entrecoupée par un obstacle se situant devant la plate-forme. La direction préférentielle de

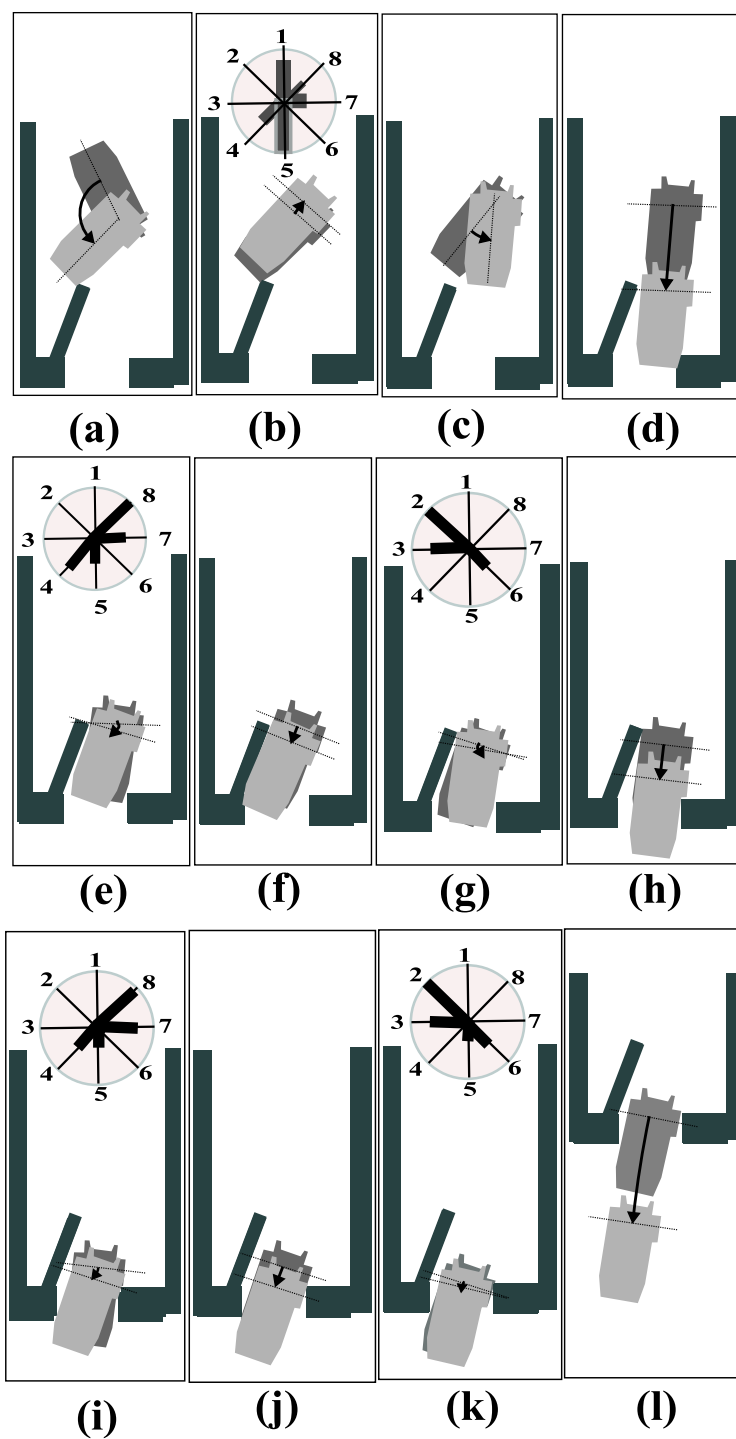


Figure 4.6 Assistance d'un passage de porte complexe commandé de façon rudimentaire.

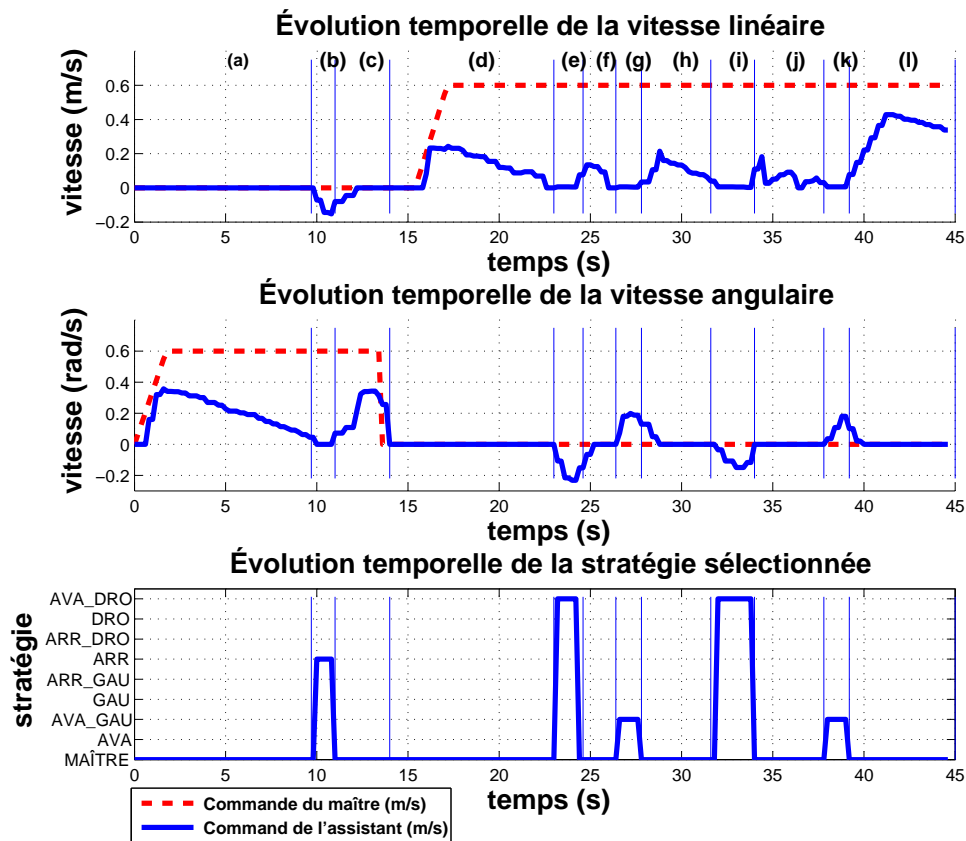


Figure 4.7 Évolution temporelle des vitesses linéaires, des vitesses angulaires et de la stratégie sélectionnée pour l'assistance d'un passage de porte.

contournement est en sens antihoraire (0) si la vitesse angulaire est positive, en sens horaire (1) si la vitesse angulaire est négative, et nulle (2) si la vitesse angulaire est nulle. Les priorités sont définies comme suit : $\{\gamma^{LIN} = 2, \gamma^{ANG} = 0.3, \gamma^{MOV} = 3, \gamma^{DIR} = 0.4, \gamma^{APP} = 2, \gamma^{CNT} = 1, \gamma^{OFM} = 0.3\}$.

Si la concentration de l'assistant est faible (λ^{ASS} fixée à 0.2), alors le choix de la direction préférentielle, en favorisant continuellement le retour dans la direction de la droite, rend impossible le contournement de l'obstacle et engendre ainsi un cycle de mouvements gauche-droit infini (les vitesses obtenues lors de ce cycle sont présentées à la figure 4.10).

Si la concentration de l'assistant est plus importante (λ^{ASS} fixée à 0.8), alors la cohérence de la séquence d'action sélectionnée par l'assistant provoque le contournement de l'obstacle. À la figure 4.8 (b), une réaction vers la gauche est sélectionnée lorsque la commande du maître provoquerait la collision, suivi de l'action de reculer en (c) qui apparaît la plus cohérente à l'action précédente. En (d) le maître reprend le contrôle avec une direction préférentielle de contournement en sens horaire jusqu'à ce que la plate-forme redevienne bloquée contre l'obstacle, ce qui engendre la sélection d'une réaction à droite en (e). En (f), la manoeuvre maîtresse peut de nouveau être appliquée jusqu'à revenir bloquée à gauche. La réaction d'avancer est alors sélectionnée en (g) jusqu'à ce que la manoeuvre maîtresse puisse être réappliquée en (h) pour finaliser le contournement de l'obstacle.

Cet exemple démontre l'importance de la stratégie maîtresse et de sa coopération avec le module d'assistance. Puisque l'assistant vise avant tout à respecter la stratégie maîtresse, cette dernière doit, autant que possible, s'adapter en fonction des contraintes d'encombrement évaluées par l'assistant. Autrement, l'assistant a davantage à demeurer concentré pour éviter des cycles d'actions répétitifs. Soulignons néanmoins que l'efficacité de la stratégie repose avant tout sur le maître d'oeuvre de cette stratégie. L'assistant, ne faisant que faciliter la tâche au maître, ne pourra jamais garantir un comportement global approprié, efficace et *intelligent*.

4.6 Conclusion

Ce chapitre a introduit un module d'assistance stratégique à l'évitement de collision qui permet une navigation sécuritaire tout en offrant une fonctionnalité de déblocage stratégique. L'efficacité de l'approche repose sur une considération précise du périmètre de la plate-forme et sur une réaction de déblocage tenant compte des objectifs et des priorités de la manoeuvre. Il a été démontré que l'assistant facilite l'obtention de fonctionnalités hautement adaptées à des encombrements complexes.

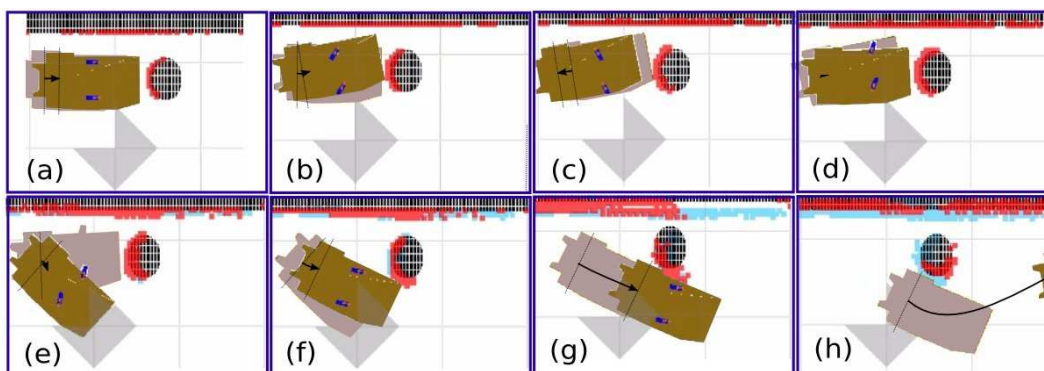


Figure 4.8 Contournement d'obstacle.

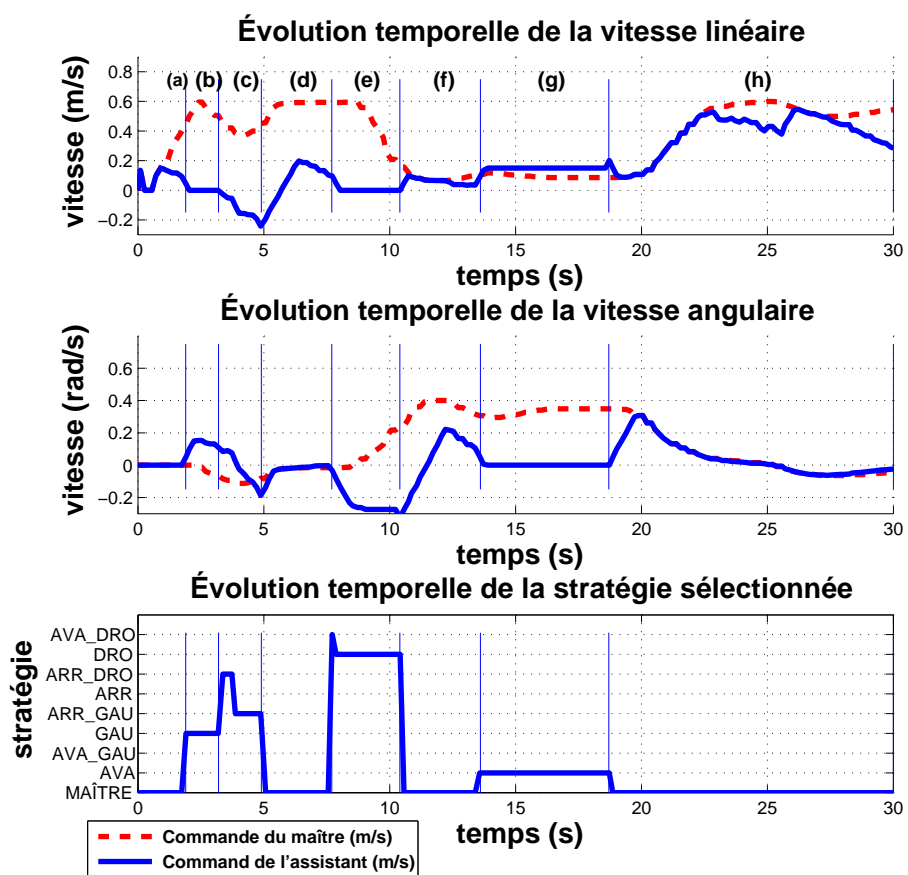


Figure 4.9 Vitesses et stratégies sélectionnées lors d'un contournement d'obstacle réussi.

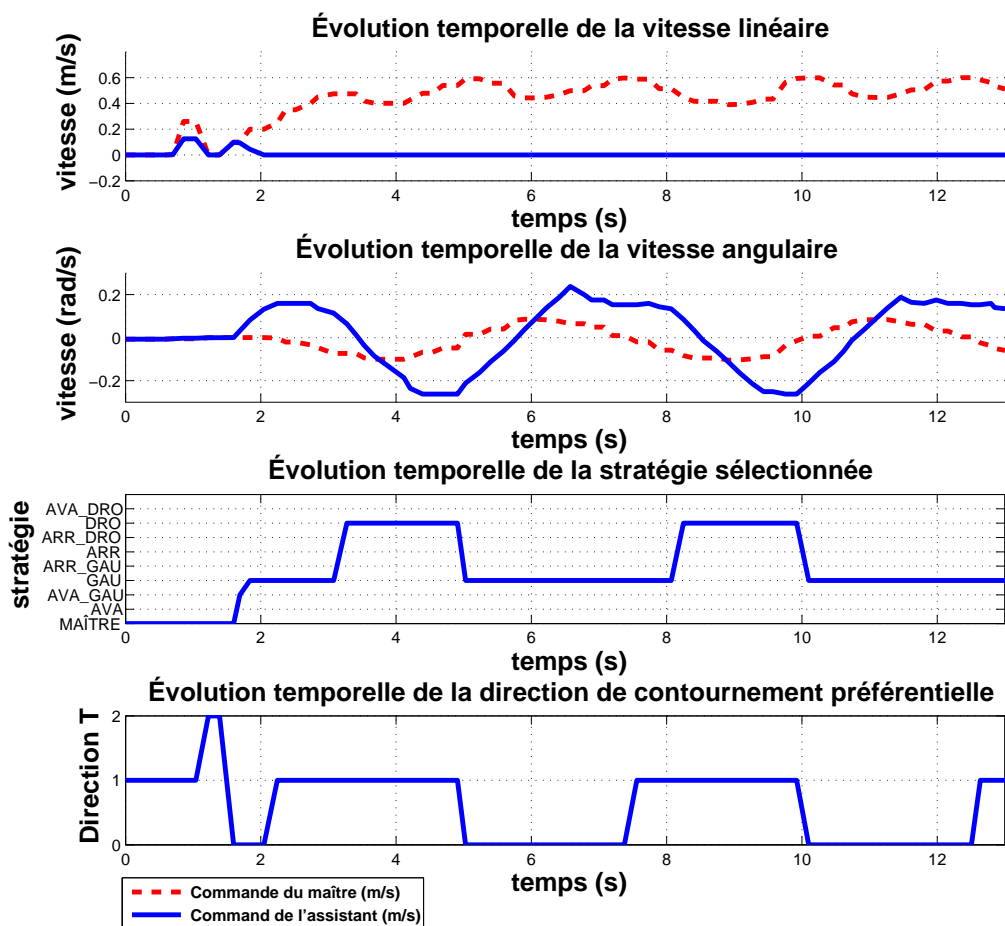


Figure 4.10 Vitesses et stratégies sélectionnées lors d'un cycle de mouvements répétitifs.

CHAPITRE 5

ARCHITECTURE DE CONTRÔLE

5.1 Introduction

Une navigation autonome en environnement dynamique exige une réaction en fonction du contexte instantané, lequel peut varier de façon imprévisible. Ceci ne peut être satisfait sans percevoir ce contexte à l'aide de mesures issues de capteurs spécialisés. La problématique consiste, dès lors, à définir comment le système exploitera ces mesures de manière à produire une navigation appropriée.

Une architecture de contrôle décrit les différentes entités impliquées dans le système, leurs rôles respectifs et les liens les unissant. Étant donné la complexité des applications robotiques¹, plusieurs auteurs se sont efforcés à proposer des architectures types pour faciliter le développement de fonctionnalités diverses.

Les fonctionnalités sont typiquement assurées par des *processus perceptuels*, qui extraient une information utile des mesures sensorielles, et par des *processus décisionnels*, qui exploitent cette information pour la prise de décisions. Les processus dits *réactifs* utilisent directement l'information sensorielle pour réaliser à la fois le travail *perceptuel* et *décisionnel*. Ces processus sont traditionnellement ordonnés selon une architecture à décomposition horizontale classique, verticale ou hybride.

Dans les architectures à décomposition horizontale Albus et Rippey (2002), Crowley (2002), telles qu'illustrées à la figure 5.1, le traitement est réalisé linéairement à partir des mesures sensorielles, de l'interprétation des mesures à la planification jusqu'au contrôle moteur. L'architecture horizontale s'avère avantageuse pour extraire des mesures une information de haut-niveau directement exploitable par les processus décisionnels, favorisant ainsi le développement de fonctionnalités évoluées. Elle est toutefois désavantageuse, d'une part, pour son inefficacité à opérer en temps réel en raison de la lourdeur des traitements requis entre les mesures sensorielles et les commandes motrices et d'autre part, pour son manque de modularité causé par l'interdépendance étroite des traitements et des interfaces utilisées.

Pour une meilleure aptitude à opérer en temps réel, Payton (1986) suggère une architecture hiérarchique, illustrée à la figure 5.2, comportant plusieurs niveaux s'exécutant en parallèle. Plus le niveau est élevé, plus l'information utilisée est évoluée. Le niveau de base exploite ainsi une

¹Cette complexité s'observe par exemple en ce qui concerne : la perception et la représentation de l'état réel de la plate-forme, de l'environnement et de la tâche à accomplir ; l'exécution d'actions appropriées ; la quantité de traitements parallèles et interdépendants requis.

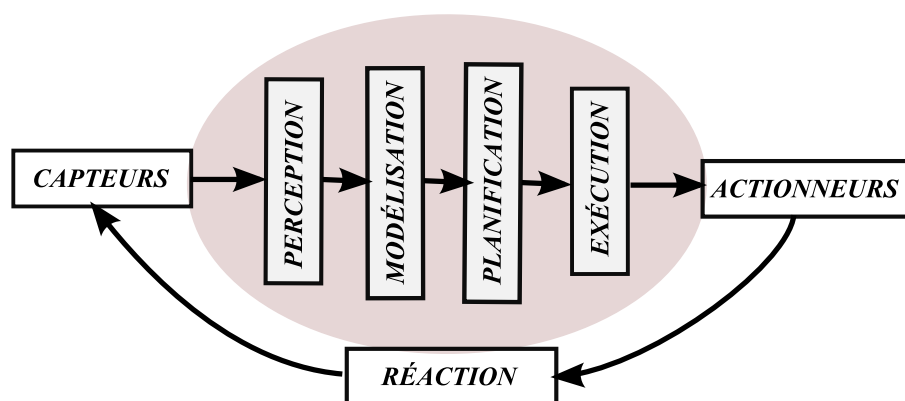


Figure 5.1 Architecture classique horizontale.

information exigeant peu de traitements. Ceci permet une bonne réactivité tout en conservant la capacité d'effectuer des décisions délibératives. À la base, la *planification réflexive* contient des processus perceptuels, nommés capteurs virtuels (*virtual sensor*), lesquels alimentent directement les processus décisionnels, nommés comportements-réflexes (*reflexive behavior*). Ceci permet la réutilisation du travail d'interprétation des mesures d'un comportement à l'autre. Cette réutilisation se limite toutefois aux cas où les comportements réflexes utilisent une information similaire. En pratique, le besoin d'information de chaque processus décisionnel est propre à sa fonction. Ainsi, l'information en sortie des capteurs virtuels se retrouvera souvent soit trop spécifique, soit trop volumineuse pour être partagée efficacement. En vue d'augmenter davantage la rapidité de traitements et la portabilité, des efforts importants ont été investis afin d'alléger la boucle de rétroaction par une décomposition verticale de processus réactifs.

Une des premières architectures verticales, présentée à la figure 5.3, fut introduite par Brooks (1987). Cette architecture (*Subsumption Architecture*) comporte des processus réactifs de différents niveaux de priorité. Chaque processus produit un comportement spécifique qui peut activer ou inhiber l'effet du processus de niveau subséquent. Cette hiérarchisation des processus rend toutefois difficile leur coopération. Anderson et Donath (1990) présentent une liste de comportements implémentés via des processus réactifs, incluant des mouvements de base (avancer, reculer,...), de suivi d'objets, d'évitement d'obstacle, d'exploration, etc. Hu et Brady (1996) proposent une architecture distribuée similaire à celle de Brooks (*Distributed Real-Time Architecture*), où chaque processus réactif est implémenté dans un processeur parallèle spécialisé (nommé *Locally Intelligent Control Agent*). Inspiré par les neurosciences, Arkin (1987) propose l'utilisation de processus perceptuels responsables de l'activation des processus réactifs, ces derniers pouvant communiquer via un tableau. Bien que ces architectures aient fait leurs preuves pour leur capacité à opérer en temps réel, elles rendent difficile le développement de manoeuvres évoluées. Cette difficulté s'explique par le niveau élémentaire de l'information utilisée par les processus réactifs, le manque d'unification du

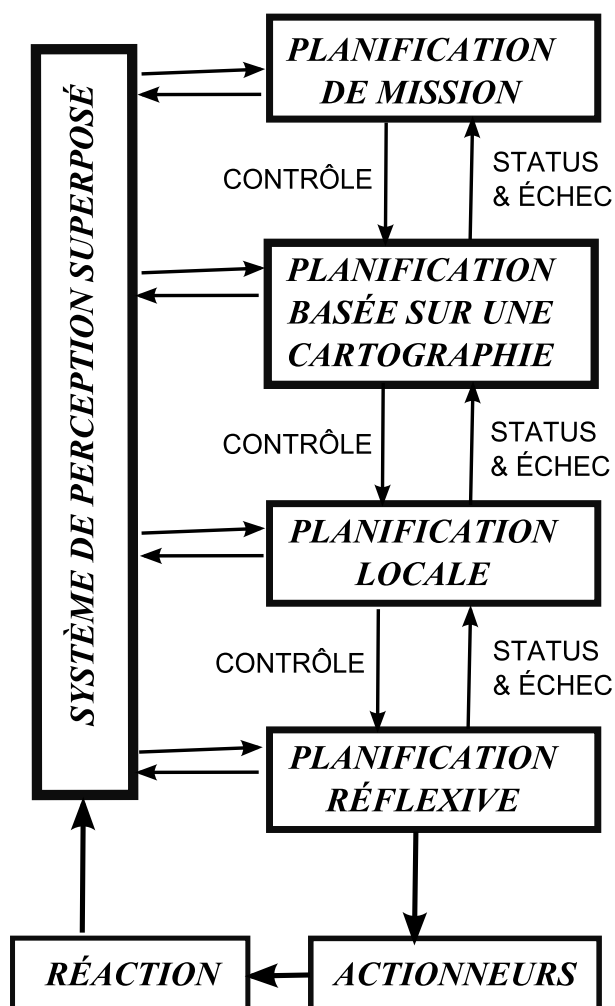


Figure 5.2 Architecture hiérarchique de Payton.

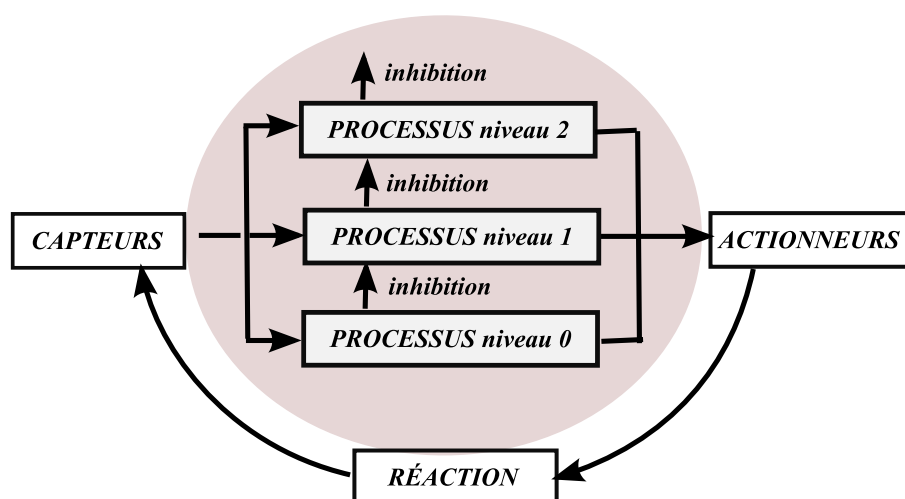


Figure 5.3 Architecture de Brooks (Subsumption Architecture)

travail d'interprétation des mesures et l'absence d'unité commune coordonnant les comportements selon une *vision globale* de la tâche à accomplir.

Afin de permettre une meilleure coordination des comportements élémentaires, ? introduit un arbitre qui fournit la commande en combinant les commandes relatives à chaque comportement. La contribution relative de chaque comportement dépend des objectifs et priorités liés au contexte. D'autre part, les processus actifs utilisent une représentation interne de l'environnement de navigation, facilitant le développement de comportements plus évolués.

Bonasso *et al.* (1997) et Alami *et al.* (1998) proposent en parallèle une architecture à trois niveaux, illustrée à la figure 5.4 : un premier niveau est responsable de la planification de tâches évoluées et de la décision² (niveau délibératif ou décisionnel) ; un second niveau sélectionne séquentiellement les comportements actifs (niveau de séquençement) et un dernier niveau comprend l'ensemble des comportements réactifs parallèles (niveau réactif ou fonctionnel).

La logique floue a été couramment utilisée pour coordonner les comportements (Saffiotti *et al.*, 1995), (Tunstel *et al.*, 1997), (Mataric, 1997), (Yavuz et Bradshaw, 2002). Pour Saffiotti *et al.* (1995), le poids de chaque comportement varie selon son degré de *désirabilité*, lequel est fonction de son *contexte d'applicabilité* lié à l'environnement local de la plate-forme. Tunstel *et al.* (1997) ajustent les règles floues à l'aide de la programmation génétique et Mataric (1997), Parasuraman *et al.* (2005) en utilisant le concept de mémoire associative floue (*Fuzzy Associative Memory*), laquelle relie la valeur des sorties en fonction de celles des entrées. Saotti (1997) utilise un arbitre sélectionnant les comportements appropriés au contexte. Chaque comportement exprime un degré de préférence envers toutes les commandes qui peuvent être appliquées, ce qui permet de sélectionner une commande offrant un bon compromis. Pour Yavuz et Bradshaw (2002), les poids relatifs des comportements proviennent d'un *manuel* spécifique à la tâche recherchée, lequel peut être enrichi par expérimentation. Les approches par logique floue ont pour principal inconvénient de produire une commande possiblement inapte à assurer une évolution convenable de la plate-forme. Puisque les comportements peuvent impliquer des objectifs contradictoires, un compromis peut effectivement signifier l'absence d'objectif précis et stable, provoquant une inefficacité de la navigation.

En somme, l'ensemble de ces travaux démontre qu'une architecture de contrôle peut être conçue de manière assez variée en cherchant à satisfaire les objectifs suivants :

1. *décision délibérative* : les actions sont planifiées avec cohérence en tenant compte des objectifs de navigation ;
2. *réactivité* : la navigation réagit rapidement aux imprévus liés à l'environnement dynamique et au contrôle de la plate-forme ;

²Notez que la fonction de supervision d'un niveau dit *décisionnel* est propre à la version de Alami *et al.* (1998).

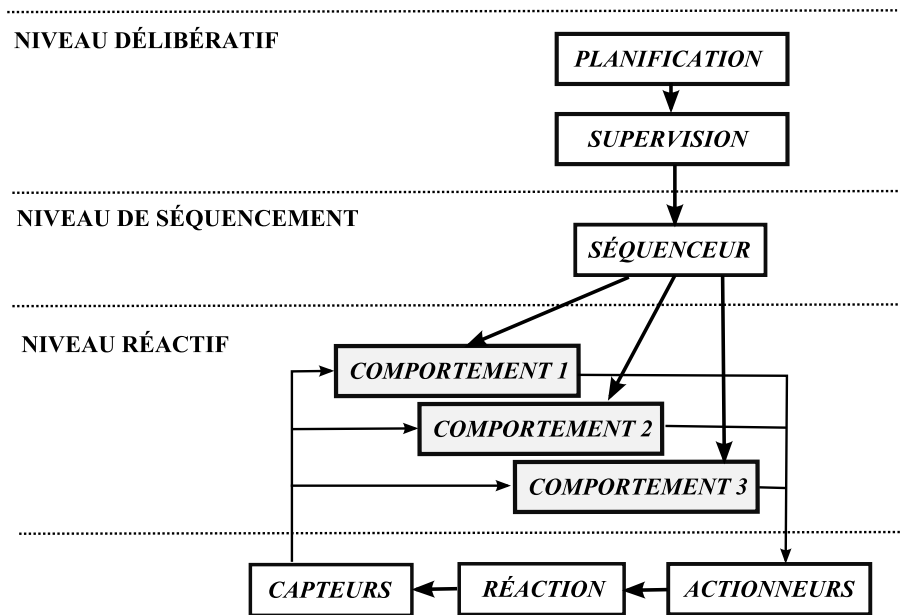


Figure 5.4 Architecture à trois niveaux.

3. *modularité* : l'architecture peut s'adapter facilement à des applications et à des plate-formes variées, et il est facile d'y ajouter des fonctionnalités ;
4. *structure claire* : les fonctionnalités offertes par le système sont clairement décrites par l'architecture.

Un défi majeur consiste à définir une architecture produisant des décisions à la fois délibératives et réactives. Si les architectures purement horizontales compromettent la réactivité, les architectures purement verticales (Brooks, 1987), (Arkin, 1987) rendent difficile la délibération. Afin d'obtenir un compromis, la plupart des architectures récentes sont hybrides (?), (Bonasso *et al.*, 1997), (Alami *et al.*, 1998), (Yavuz et Bradshaw, 2002). Cette hybridation s'est typiquement traduite par l'ajout, aux architectures verticales, d'entités responsables de coordonner les processus réactifs. Les architectures se sont ainsi retrouvées à la fois hiérarchiques et réactives, tel qu'expliqué par Arkin (1989). Si le problème de coordination des comportements est résolu, ces comportements réactifs demeurent néanmoins limités par le niveau élémentaire de l'information utilisée et nécessitent ainsi des dédoublements d'effort : d'une part, pour convenir à des configurations matérielles variées et, d'autre part, en ce qui concerne le travail d'interprétation des mesures sensorielles.

Pour améliorer simultanément la capacité de délibération, de réactivité et la modularité, nous proposons une architecture hybride comprenant : une réalité virtuelle accessible à tous les processus décisionnels qui unifie le travail d'interprétation des mesures, une banque de comportements réactifs réutilisables, des processus décisionnels responsables de manoeuvres évoluées coopérant avec un module d'assistance à l'évitement de collision pour une navigation adaptée aux environnements

dynamiques restreints. Contrairement aux approches précédentes se limitant à une représentation de l'environnement de navigation, notre réalité virtuelle inclut l'ensemble des éléments utiles décrivant le contexte, dont la plate-forme. L'architecture peut ainsi être utilisée à la fois pour le contrôle réel et la simulation. La réactivité est assurée par l'utilisation d'un ensemble de processus asynchrones participant simultanément à l'actualisation de la réalité virtuelle et à la prise de décision. Ainsi, l'information élémentaire relative aux obstacles est actualisée rapidement offrant une réaction prompte d'évitement de collision. La section 5.2 décrit le fonctionnement de l'architecture de contrôle et la section 9.2 détaille son utilisation dans l'application de fauteuil roulant autonome.

5.2 Description de l'architecture de contrôle

L'architecture de contrôle est centrée sur une réalité virtuelle à la base de la délibération. En se référant aux sciences cognitives, cette réalité virtuelle représente l'objet du *raisonnement*. Elle est structurée selon les besoins utiles (motivations) avec une volonté de cohésion de l'information (compréhension) et comporte une évolution à l'image de celle du système réel (permettant l'anticipation et la décision). Le raisonnement se concentre alors sur deux problématiques parallèles : obtenir une représentation fidèle de la réalité *utile* et définir les actions conséquentes satisfaisant les objectifs du système.

La figure 5.5 présente l'architecture proposée, ses principales composantes étant explicitées plus bas. Il s'agit d'une structure de base sur laquelle peuvent se greffer des processus additionnels nécessaires à l'application. Les flèches représentent des flux entrée-sortie, lesquels seront en nombre réduit en pratique puisque chaque processus exploite seulement les entrées qui lui sont utiles.

5.2.1 Réalité virtuelle

L'identification de la réalité *utile* à la prise de décision est nécessaire à la définition d'une représentation de complexité minimale et suffisante³. La réalité virtuelle comporte plusieurs unités structurées selon les principes de la programmation par objet de Alan Kay Cox et Novobilski (1987), qui est notamment largement utilisée pour la conception de jeux vidéos. Dans le contexte d'une navigation autonome, les unités comprendront minimalement la plate-forme mobile et possiblement un environnement statique et dynamique, un usager, etc.

La plate-forme mobile virtuelle concentre le travail d'interprétation des mesures liées à la configuration matérielle, tel que l'extraction de points d'occupation à partir de données télémétriques. Ceci libère l'ensemble des processus décisionnels de cette tâche, lesquels peuvent, dès lors, direc-

³À titre d'exemple, il pourrait s'avérer inutilement coûteux en temps de traitements de travailler en trois dimensions si la navigation, réalisée sur un plan, se base sur un raisonnement 2D.

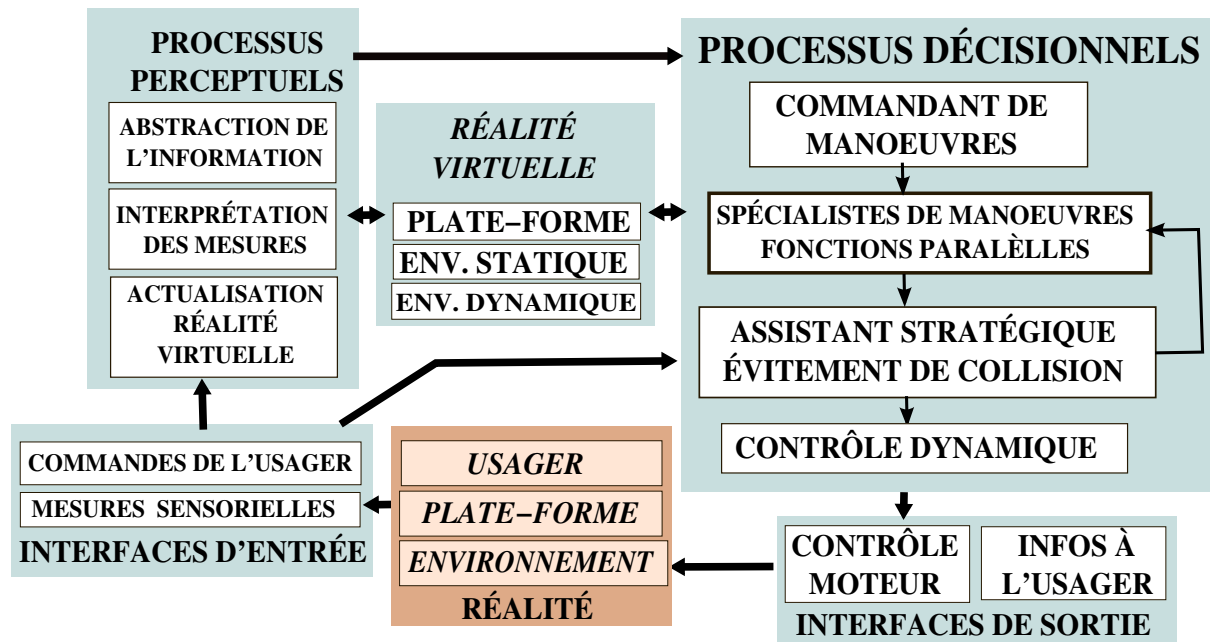


Figure 5.5 Architecture de contrôle proposée.

tement utiliser l'information utile à leurs décisions, et ce, indépendamment de la configuration matérielle. Ceci simplifie leur conception, les redondances des traitements effectués par les processus et permet de les réutiliser sur des plate-formes variées (contribuant ainsi à l'objectif de modularité).

Chaque unité possède des attributs et des fonctions d'accès. Ces fonctions sont parfois liées à des unités voisines⁴. Les relations entre les unités se veulent à l'image de la réalité utile. Les attributs se subdivisent en trois groupes :

- *les attributs statiques* : réfèrent à des éléments fixes, tels que la configuration matérielle, la position d'obstacles statiques, etc. Ils peuvent être décrits à priori ou estimés par des abstra-teurs d'informations (présentés plus bas) ;
- *les attributs persistants* : représentent des éléments dont l'évolution est lente, tels que la température, l'état de charge des batteries, les caractéristiques de l'utilisateur, etc.
- *les attributs transitoires*⁵ : comportent une évolution rapide et exige donc une actualisation rapide. Ces attributs comprennent les accélérations de la plate-forme, ses vitesses de déplacement, sa pose instantanée, son inclinaison, la position des obstacles dynamiques, etc.

⁴Par exemple, la position d'une plate-forme et sa proximité avec les obstacles sont souvent liées à une carte d'oc-cupation.

⁵Notez que l'évaluation d'attributs transitoires nécessite couramment l'utilisation d'attributs statiques. À titre d'exemple, la position des obstacles environnants (attributs transitoires), à partir de mesures sensorielles, dépend de l'emplacement des capteurs sur la plate-forme (attributs statiques).

5.2.2 Banque de comportements

Un *comportement* est typiquement offert par une *méthode* définissant une action ou une séquence appropriée d'actions en fonction des objectifs, contextes et contraintes. Tel qu'il a été mentionné dans l'introduction, les architectures récentes implémentent chaque comportement dans un processus actif distinct. Dans notre cas, chaque comportement est défini dans une structure en mémoire morte pour être réutilisé facilement lors de l'implémentation des processus actifs. Cette réutilisation des comportements à même la structure de plusieurs processus actifs est rendue possible par le niveau général des méthodes utilisées, lesquels offrent un fonctionnement flexible à partir d'une information de haut-niveau, contrairement aux processus réactifs produisant un comportement spécifique à partir d'une information précise étroitement liée à la configuration matérielle.

5.2.3 Processus perceptuels

Chaque processus perceptuel participe à l'identification de la réalité utile. Le travail *perceptuel* se situe à différents niveaux. Il comprend d'abord l'interprétation de l'information sensorielle en vue d'en extraire une information utile, puis l'actualisation de la réalité virtuelle en fonction de cette information. Ensuite, une perception *introspective* permet d'abstraire la représentation interne à des fins d'observation, de correction ou d'extraction d'éléments évolués. Les processus perceptuels se subdivisent ainsi en trois groupes :

- *les interpréteurs sensoriels* : utilisent les mesures brutes et/ou extraites de la plate-forme virtuelle afin d'évaluer une information utile ;
- *les actualisateurs de la réalité virtuelle* actualisent les attributs transitoires de la réalité virtuelle ;
- *les abstraiteurs d'information* : observent la réalité virtuelle de manière passive ou active. L'analyse dite active sert à la construction ou la mise à jour d'attributs issus de différents niveaux d'abstraction. Elle peut être effectuée, à titre d'exemple, via une analyse multi-temporelle de l'information.

Des exemples concrets de processus perceptuels seront présentés à la section 9.2.

5.2.4 Processus décisionnels

Les processus décisionnels sont responsables de l'atteinte des objectifs du système. Ils opèrent en accédant à différentes sources d'information parmi la réalité virtuelle, les processus actifs et les mesures sensorielles. Ils comprennent un niveau de commande, un niveau de spécialistes de manoeuvres⁶ et d'assistance. Le niveau de commande choisit le spécialiste de manoeuvres répondant

⁶Ce niveau remplace les niveaux de séquençement et de comportements réactifs des architectures à trois niveaux de Bonasso *et al.* (1997) et Alami *et al.* (1998)

aux objectifs de navigation. Les spécialistes de manoeuvres sont implémentés en des processus parallèles distincts, chacun doté de modes de fonctionnement et de comportements particuliers. Plutôt que d'être coordonnés par un module de séquençement (Bonasso *et al.*, 1997), (Alami *et al.*, 1998) et (Gat *et al.*, 1997), les comportements réactifs utilisés par un spécialiste sont tous réunis à même le module et ordonnancés par une machine à état interne. Ce rapatriement comporte les avantages suivants :

- *facilite l'adaptation aux besoins spécifiques à la manoeuvre* : chaque comportement peut être finement adapté à la manoeuvre courante sans alourdir les communications inter-processus ;
- *facilite une conception robuste* : les adaptations comportementales d'un spécialiste de manoeuvres n'ont aucun impact sur les modules parallèles, ce qui permet de concentrer l'effort de conception de chaque module de façon séparée ;
- *clarifie les fonctionnalités offertes* : puisque le nombre de comportements réactifs⁷ est normalement supérieur au nombre de manoeuvres évoluées, le nombre de processus parallèles correspondra, au pire cas, à celui observé chez les approches réactives et hybrides (où chaque comportement est un processus distinct). En réduisant le nombre de processus, de liens interprocessus et en remplaçant les comportements élémentaires par des spécialistes de manoeuvres, les fonctionnalités offertes par le système se retrouvent clairement élucidées par l'architecture, facilitant sa compréhension, son exploitation et, par conséquent, son développement.

D'autre part, le libre accès à la réalité virtuelle évite aux processus décisionnels d'avoir besoin d'une présélection de l'information extraite des mesures (cette présélection s'observe dans les approches classiques et dans l'architecture de Payton (1986)). Ce libre accès évite aussi la répétition systématique du travail d'interprétation des mesures, telle qu'observée dans les approches basées sur une couche de processus réactifs (Arkin, 1987), (Anderson et Donath, 1990), (Brooks, 1987), (Hu et Brady, 1996), (Bonasso *et al.*, 1997), (Gat *et al.*, 1997). Exemptés du travail d'interprétation des mesures bas-niveau, les processus décisionnels se retrouvent facilement réutilisables d'un système à l'autre sans égard au type et à la configuration des capteurs employés.

5.2.5 Module d'évitement de collision

L'évitement de collision est réalisé par un module qui assiste l'ensemble des processus comportementaux en tenant compte des objectifs et priorités de la manoeuvre. Ce dernier réduit en surcroît l'effort de conception des processus comportementaux et assure des actions à la fois délibératives et réactives.

⁷Il est important ici de ne pas confondre le nombre de comportements réactifs requis pour réaliser l'ensemble des manoeuvres et le nombre de comportements partagés dans la banque, ce dernier pouvant facilement être inférieur au nombre de manoeuvres.

5.2.6 Entrées/sorties et simulations

Les interfaces d'entrées et de sorties sont responsables de la communication matérielle, pour une opération réelle, et de la communication avec une *réalité simulée* lors d'une simulation (voir figure 5.6). La *réalité simulée* peut être obtenue par des unités analogues ou identiques à celles utilisées dans la réalité virtuelle pour le contrôle de la plate-forme réelle. Toutefois, pour réduire la quantité d'unités, certaines peuvent être réemployées en y ajoutant des attributs et fonctions liés à la réalité simulée.

5.2.7 Inconvénients

L'architecture de contrôle proposée comporte certains inconvénients devant être discutés :

- *Changement continu de la réalité virtuelle au cours des développements.* Comme il a été mentionné, les processus décisionnels dépendent fortement de la réalité virtuelle *utile*. Si de nouveaux processus nécessitent une nouvelle information au niveau de la réalité virtuelle, cette dernière doit donc être adaptée en conséquence. Le développement de la réalité virtuelle peut ainsi être continuellement prolongé pour répondre aux besoins des nouveaux processus décisionnels ;
- *Partage de l'information.* Le partage de la réalité virtuelle par tous les processus doit être géré avec soin pour éviter des conflits d'accès mémoire et pour éviter que les processus attendent les uns après les autres ;
- *Organisation du travail.* Dans le contexte d'un développement informatique effectué par plusieurs personnes, l'interdépendance entre les unités peut augmenter le besoin d'interaction entre les personnes.

5.3 Conclusion

Ce chapitre a introduit une architecture de contrôle offrant des fonctionnalités de navigation à la fois délibératives, réactives et modulaires : délibératives, puisqu'elles basent leurs raisonnements sur une information multi-niveau ; réactives, puisque l'information transitoire est rapidement actualisée et prise en compte par un assistant d'évitement de collision, et modulaire, car les fonctionnalités de navigation peuvent facilement être réutilisées sur plusieurs plates-formes indépendamment de la configuration matérielle et de la simulation à l'application réelle. Cette architecture a permis un développement efficace de l'ensemble des fonctionnalités de navigation du FRMSA. Sa capacité d'opération temps-réel est démontrée, au chapitre 10, à travers les performances du FRMSA en environnement dynamique et restreint.

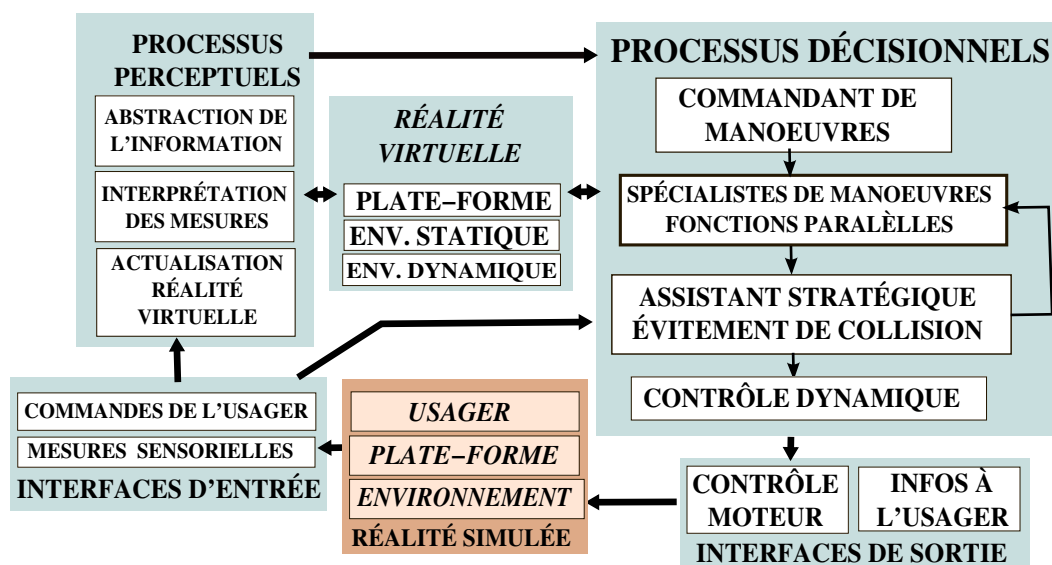


Figure 5.6 Utilisation de l'architecture de contrôle à des fins de simulation.

CHAPITRE 6

MANOEUVRE ÉVOLUÉE 1 : TRAVERSÉE DE PASSAGES ÉTROITS

6.1 Introduction

Traverser des passages étroits s'avère une tâche critique pour une plate-forme mobile autonome, laquelle doit demeurer assez *craintive* pour ne pas entrer en collision avec les obstacles latéraux, mais assez confiante et agile pour poursuivre son évolution : un compromis parfois difficile à résoudre. Ces difficultés liées aux passages étroits sont d'ailleurs bien décrites dans la littérature (Kavraki *et al.*, 1996), (Hsu *et al.*, 1998). Une des difficultés réside dans la précision exigée de la réponse dynamique du système, puisque les vitesses de déplacements sécuritaires à la proximité d'obstacles doivent être maintenues avec précision à de faibles amplitudes. Or, si une réponse dynamique en deçà de la commande engendre un arrêt, une réponse au dessus risque de provoquer une collision. Cette manoeuvre est également sensible à l'incertitude liée à l'environnement et aux mesures sensorielles, lesquelles peuvent induire une mauvaise évaluation de la configuration relative des obstacles et de la plate-forme et provoquer des collisions en conséquence. En somme, le principal défi relatif à la traversée de passages étroits réside dans l'élaboration d'une stratégie de passage s'adaptant avec précision à des encombrements variés dynamiques et à une évolution incertaine de la plate-forme (due à l'imprécision du contrôle dynamique).

En environnement intérieur, un passage étroit des plus typiques est sans aucun doute le passage d'une porte, une tâche qui cause d'ailleurs de nombreux dommages matériels chez les usagers de FRM conventionnel. La traversée d'un passage nécessite premièrement de reconnaître le passage, de maintenir à jour sa position relativement à celle de la plate-forme et de générer les mouvements qui permettront à la plate-forme de le traverser.

En environnement connu, le passage peut être identifié par sa position. En environnement inconnu, le passage doit être identifié à partir de l'information sensorielle. Par exemple, Kim et Nevatia (1998) proposent une méthode qui reconnaît les portes et portiques sur une image par analyse de surfaces. Simmons *et al.* (2003) exploitent des données télémétriques et Eberst *et al.* (2000), Monasterio *et al.* (2002), Muñoz-Salinas *et al.* (2006), des images noir et blanc afin d'extraire des droites caractéristiques du passage à traverser. Cicirelli *et al.* (2003) reconnaissent la porte par ses propriétés géométriques extraites d'une image via un réseau de neurones. Angelov *et al.* (2004) proposent une méthode de reconnaissance de porte à partir de ses caractéristiques visuelles (telles que sa silhouette et sa couleur) et comportementales (établi par un modèle de mouvement). Mandel *et al.* (2005) reconnaissent une porte en combinant l'information télémétrique et vidéo,

laquelle permet d'identifier des segments verticaux caractéristiques des portiques. Étant donné le nombre appréciable d'ensembles de mesures pouvant référer à un même passage¹ et la variabilité des passages envisageables : il importe néanmoins d'obtenir une méthode la plus générale possible fonctionnant également avec des passages inconnus à priori. Pour ce faire, nous proposons une approche qui réalise une analyse spatio-fréquentielle de l'environnement local afin de localiser une crête correspondant au passage à traverser.

Ensuite, une localisation précise de la configuration du passage, relativement à celle de la plate-forme, est nécessaire pour que la décision soit adaptée au contexte dynamique réel². Si la configuration du passage étroit est fixe dans le repère d'une carte, alors la plate-forme doit être localisée avec précision. Dans le cas où la plate-forme n'est pas localisée avec précision, ou simplement pour obtenir une plus grande robustesse, la configuration relative du passage peut être réévaluée périodiquement, tel que nous le réaliserons dans ce chapitre.

Concernant le problème de générer les mouvements assurant la traversée, certaines approches utilisent une structure construite par expérimentations qui établit la commande appropriée en fonction des entrées sensorielles (Kasper *et al.*, 2001), (Monasterio *et al.*, 2002), (Iglesias *et al.*, 2007). Ces approches s'avèrent pratiques pour sauver des efforts de développement, car la structure décisionnelle est construite automatiquement. Toutefois, les fonctionnalités résultantes se retrouvent étroitement liées à la configuration des capteurs en entrée et peuvent difficilement garantir la sécurité, l'efficacité et le confort requis pour des applications à objectifs commerciaux comme les fauteuils roulants semi-autonomes.

De manière plus courante, la traversée automatique d'un passage étroit est assurée par le suivi d'une trajectoire passant au travers. Pour ce faire, la planification de trajectoires vise à minimiser la probabilité de collision avec les obstacles environnants. Dans cette perspective, la planification de Nagatani et Yuta (1993) minimise le risque lié à l'incertitude sur la pose de la plate-forme et sur la carte temporaire des obstacles environnants. Dans (Irie *et al.*, 2003), (Mandel *et al.*, 2005) et (Pepy et Lambert, 2006), la construction de la trajectoire est réalisée à priori par discrétisation de l'espace de recherche à partir d'une carte de l'encombrement des lieux, à l'aide de diagrammes de Voronoi (Aurenhammer, 1991). La trajectoire est ensuite modulée pour réduire les risques de collision, par exemple via une méthode d'exploration rapide de branches aléatoires (*Safe Rapidly-exploring Random Trees*) dans (Pepy et Lambert, 2006).

De nombreuses approches construisent la trajectoire à l'aide d'une feuille de route probabiliste, ou *Probabilistic Roadmap*, par exemple (Kavraki *et al.*, 1996), (Hsu *et al.*, 1998), (Hsu *et al.*, 2003), (Sun *et al.*, 2005), (Wang et Li, 2009). La feuille de route probabiliste, introduite par Kavraki *et al.*

¹Les mesures varieront en outre selon l'angle de vue du passage et la distance de séparation.

²En effet, une erreur de quelques centimètres sur l'estimation de la pose relative peut signifier une collision en lieux restreints. Par exemple, notre FRM Quickie 646, d'environ 68 centimètres de large, doit franchir des portes de 86 cm. Ceci laisse en moyenne moins de 9 cm de libre par côté, offrant très peu de marge d'erreur.

(1996), vise à relier la configuration courante du robot à la configuration cible (se situant de l'autre côté du passage) par une séquence de configurations intermédiaires exemptes de collision. Pour ce faire, plusieurs configurations intermédiaires sont créées de manière aléatoire entre la pose courante et la pose cible. Les configurations voisines séparées par un parcours exempt de collision sont ensuite reliées entre elles pour former un graph de connectivités. Une technique comme Dijkstra ou A^* permet dès lors de trouver la séquence minimisant la longueur d'un parcours sécuritaire. Un enjeu important avec cette technique est de définir la densité des configurations aléatoirement créées (Amato *et al.*, 1998), (Boor *et al.*, 1999), (Hsu *et al.*, 2003), laquelle doit être assez forte au niveau des passages étroits et demeurer assez faible ailleurs pour diminuer la quantité des traitements. Ces procédures restent néanmoins plutôt lourdes en traitements pour pouvoir se répéter simultanément à court intervalle de temps (tel que requis en environnement dynamique). Ainsi, ce chapitre introduit une méthode permettant de créer et mettre à jour en temps réel une trajectoire traversant un passage étroit.

Pour un fonctionnement robuste à l'imprécision de la réponse dynamique et aux bruits de mesures, une méthode réactive d'évitement de collision doit être employée. Le principal défi est alors de coordonner le suivi de la trajectoire au besoin réactif d'évitement de collision. L'utilisation de champs de force (Khatib, 1985), (Borenstein et Koren, 1991), (Ulrich et Borenstein, 1998) est typique dans ce contexte, mais ne garantit pas une interaction constructive entre le suivi de la trajectoire et l'évitement de collision. Pour satisfaire simultanément aux objectifs d'évitement de collision et du suivi, l'assistant stratégique du chapitre 4 est employé.

Ce chapitre contribue par l'apport d'une méthode de traversée de passages étroits, laquelle présente une robustesse appréciable aux environnements restreints. Cette robustesse est offerte par : une nouvelle technique d'identification générale d'un passage étroit par analyse spatio-fréquentielle, l'introduction d'une méthode apte à actualiser en temps réel un chemin discret en fonction de la géométrie de la plate-forme et des obstacles avoisinants, un emploi spécial de la technique de suivi de séquence de points de passage du chapitre 3 et une collaboration avec l'assistant d'évitement de collision du chapitre 4. La section 6.2 présente le problème à résoudre. La méthode est ensuite détaillée à la section 6.3 et des exemples d'expérimentation sont finalement présentés à la section 6.4.

6.2 Exposé du problème

L'objectif est d'obtenir une méthode assurant l'exécution automatique de passages étroits en environnements dynamiques variés et restreints. Lorsque la traversée est commandée, le passage se situe quelque part devant la plate-forme. L'ouverture du passage est donc bien visible vue de la position de la plate-forme. Le passage doit être localisé précisément et traversé ensuite.

6.3 Méthode de traversée de passages étroits proposée

La réalisation du passage étroit comporte trois aspects : identifier la direction du passage, construire un chemin discret le traversant et assurer le suivi de ce chemin.

6.3.1 Identification du passage par analyse spatio-fréquentielle

Notre technique exploite les points d'occupation issus des données des capteurs extéroceptifs. Ces points sont pré-filtrés afin d'en extraire une courbe caractéristique liée aux premiers obstacles perçus à partir de la plate-forme, laquelle représente l'évolution spatiale des obstacles environnants contraignant le mouvement. Cette courbe est ensuite filtrée pour atténuer l'amplitude des oscillations liées aux pulsations spatiales dont la demi-période est inférieure à la largeur de la plate-forme. Il en résulte une courbe dont les oscillations de fortes amplitudes peuvent contenir la largeur de la plate-forme. Les crêtes de la courbe représentent ainsi des candidats potentiels de passages étroits traversables. Nous considérons que celle comportant la plus grande amplitude est liée au passage étroit recherché. La direction du sommet de la courbe correspondra dès lors à celle du passage étroit.

Filtrage des points utilisés

Le filtrage des points est schématisé à la figure 6.1. Les points d'occupation $Q = \{q_j, j = 1, \dots, M\}$ sont fournis par la carte dynamique de la réalité virtuelle à partir d'un laser virtuel pointant vers l'avant de la plate-forme et échantillonnant avec un pas angulaire fixe $\Delta\phi$, tel que représenté en (a). Ces points, exprimés dans le repère de la plate-forme, sont compris dans une plage angulaire α (centrée sur l'axe des x) et classés selon leur orientation ϕ_j (relative à l'axe des x). Chaque point q_j se trouve à une distance d_j du centre de giration.

L'objectif est d'obtenir un groupe de points $C = \{c_j, j = 1, \dots, M\}$ représentatif du premier niveau d'obstacles perçus à partir de la plate-forme. Le groupe de points servira, à la prochaine étape, à l'identification d'une courbe caractéristique des obstacles frontaux. Dans cet objectif, les points recherchés se situeront possiblement à des endroits inoccupés de l'environnement, tel qu'observé en (d).

Le groupe de points C recherché est obtenu en bornant l'augmentation de distance des points consécutifs par un seuil d_{max} en parcourant la séquence en sens horaire en (b), puis en sens anti-horaire en (c). Le groupe de points intermédiaire, extrait du parcours en sens horaire, est nommé C^{tmp} . Le groupe recherché C est clairement illustré en (d).

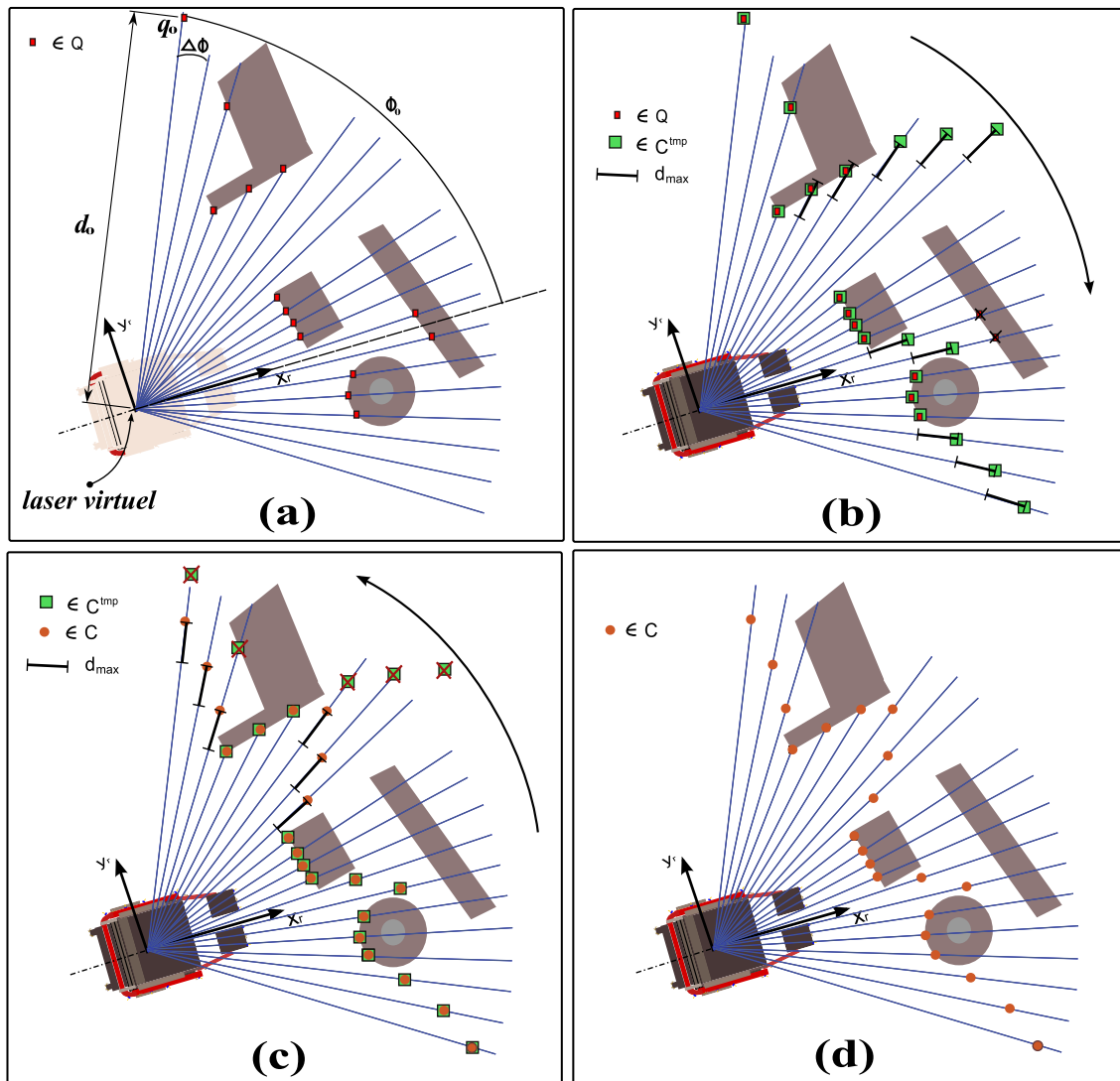


Figure 6.1 Obtention d'un ensemble de points relatifs aux premiers obstacles contraignant le mouvement : (a) acquisition des points d'occupation du laser virtuel ; (b) limitation de l'augmentation de la distance entre d_j et $d_{j+1} \forall j = 1, \dots, M-1$ (en sens horaire) ; (c) de la distance entre d_{j-1} et $d_j \forall j = M, \dots, 2$ (en sens antihoraire) ; (d) ensemble de points recherché.

Extraction de la courbe caractéristique

La figure 6.3 présente l'extraction de la courbe caractéristique. Cette courbe est obtenue en appliquant un filtre passe-bas discret sur la séquence de distances $\{d_j, j = 1, \dots, M\}$ liée à l'ensemble C , en insérant séquentiellement dans le filtre chaque distance en sens horaire (1 à M) en (b) pour obtenir une suite S_1 , laquelle est ensuite filtrée de la même façon en sens antihoraire (c) pour obtenir la suite S_2 clairement illustrée en (d).

Le filtre passe-bas utilisé n'a aucun zéro et possède une pulsation de coupure causant l'atténuation des oscillations relatives aux passages trop étroits. Supposant une plate-forme de largeur $l_y^{(rob)}$ et une moyenne \bar{d} des distances de l'ensemble C (tel qu'illustré à la figure 6.2), la période spatiale d'une sinusoïde incluant la largeur de la plate-forme sera de $2 \cdot l_y^{(rob)}$ et la période angulaire correspondante sera :

$$\phi = \frac{2 \cdot l_y^{(rob)}}{\bar{d}} \quad (6.1)$$

La valeur de la pulsation de coupure ω_c de cette courbe sera donc :

$$\omega_c = \frac{\pi \bar{d}}{l_y^{(rob)}} \quad (6.2)$$

Localisation du passage recherché

Nous supposons que le passage étroit recherché produit sur la courbe S_2 un sommet de profondeur maximale relativement à sa *base locale* la plus approchée. La *base locale* est définie comme étant la position la plus basse d'une pente descendante. La hauteur d'un sommet relativement à sa base locale est illustrée à titre d'exemple sur la figure 6.4. Dans cette circonstance, la hauteur du sommet se définit selon sa base de gauche, laquelle est effectivement plus rapprochée que sa base de droite.

La courbe S_2 comporte les sommets $\Lambda = \{\lambda_j, j = 1, \dots, N\}$. Chaque sommet $\lambda_j = \{q_j, h_j, \phi_j\}$ comporte une position q_j , une profondeur h_j et une orientation ϕ_j . Le sommet du passage recherché λ^{pass} correspond à celui de profondeur maximale. La figure 6.5 illustre un exemple de sommet liés à une courbe S_2 ainsi que leur hauteur respective. Dans cet exemple, le sommet de hauteur h_1 est supérieur et correspond ainsi au passage à traverser.

6.3.2 Extraction du chemin discret traversant le passage

La construction du chemin repose sur un ensemble de points d'occupation compris dans une zone centrée sur l'*axe de traversée*, qui se définit comme étant la droite traversant le point de giration de la plate-forme en direction du passage (selon l'orientation ϕ^{pass}). La zone de traversée,

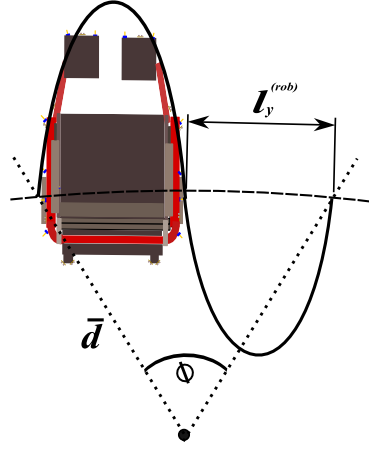


Figure 6.2 Sinusoïde dont la demi-période spatiale correspond à la largeur de la plate-forme.

représentée à la figure 6.6 (a), a une largeur a et une longueur b . Elle se subdivise en régions de longueur égale à la distance entre la face avant de la plate-forme à son point de giration, soit $l_{xp}^{(rob)}$. Pour chacune de ces régions, le point d'occupation le plus approché de l'axe de traversée est sélectionné à la gauche et à la droite de l'axe, tel qu'illustré en (b). Ce groupe forme un ensemble de points critiques. En (c), un point de passage est inséré, pour chaque région, à la position la plus rapprochée de l'axe de traversée qui assure une distance suffisante entre la plate-forme et les points critiques (distance supérieure à une distance minimale $d^{(min)}$ considérant que la largeur de la plate-forme est $l_{yp}^{(rob)}$). Si ce n'est pas possible, alors le point est inséré à une position telle que les distances avec les points critiques de gauche et de droite soient équivalentes.

6.3.3 Suivi et mise à jour du chemin

La trajectoire évaluée à la section précédente doit préférablement être suivie non pas par le centre de giration de la plate-forme, mais par un point au centre de sa façade, de position $\{x_k^{(av)}, x_k^{(av)}\}$ présentée à la figure 6.7. Ceci a pour effet de centrer précisément la face avant dans le passage pour minimiser les risques d'accrochage. Comme l'avant n'est pas soumis à une contrainte non holonomes, contrairement au centre de giration, on peut présumer que le point est toujours orienté selon la direction de la prochaine cible, d'où une erreur d'orientation $\phi_k^{(av)}$ toujours nulle. Nommant $\{v_k^{(av)}, \omega_k^{(av)}\}$ les vitesses produites par la méthode de suivi de séquence de points du chapitre 3 (avec $\omega_k^{(av)} = 0$ puisque $\phi_k^{(av)} = 0$), alors les vitesses correspondantes au centre de giration sont estimées comme suit :

$$v_k^{ref} = v_k^{(av)} \cos(\theta_k - \theta_k^{(av)}) \quad (6.3)$$

$$\omega_k^{ref} = v_k^{(av)} \sin(\theta_k - \theta_k^{(av)}) / l_{yp}^{(rob)} \quad (6.4)$$

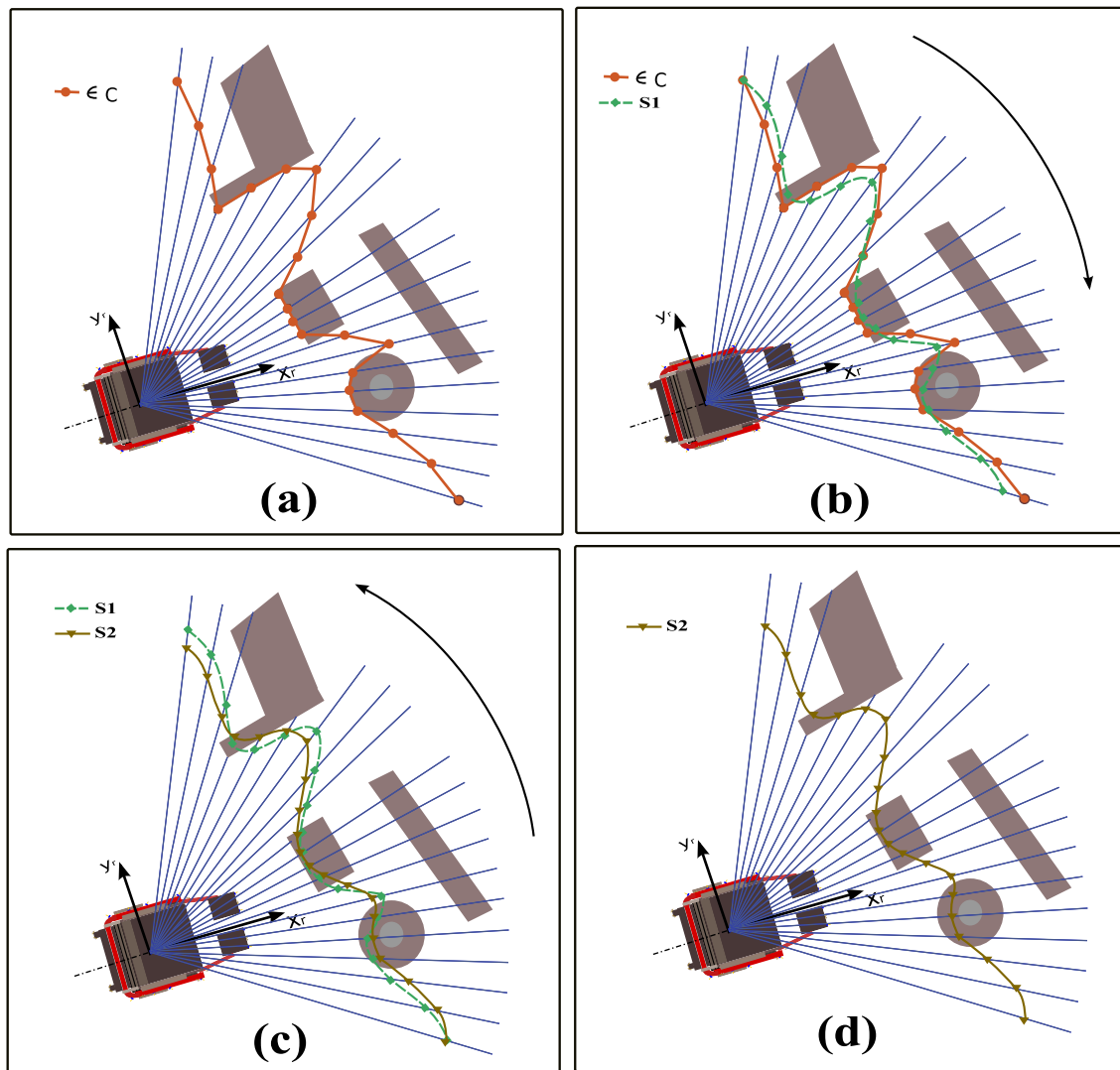


Figure 6.3 Extraction de la courbe caractéristique des obstacles frontaux.

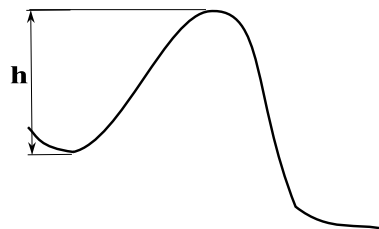


Figure 6.4 Illustration de la hauteur d'un sommet relativement à sa *base locale*. La hauteur correspond à la longueur minimale entre la base de gauche et de droite.

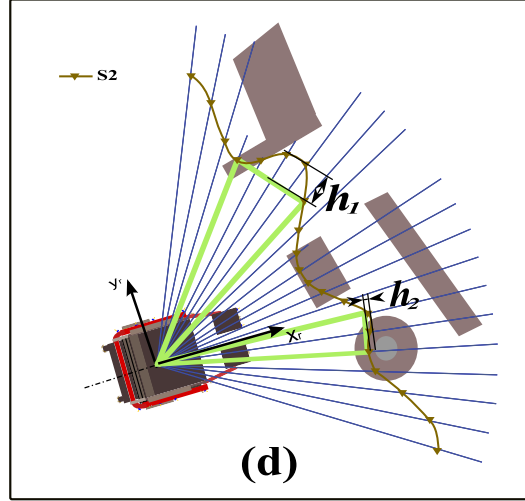


Figure 6.5 Exemple d'extraction des sommets d'une courbe S_2 et de leurs profondeurs.

La coopération avec l'assistant d'évitement de collision assure un passage efficace sans recourir à une planification coûteuse dans l'espace de configuration. Le mode stratégique de l'assistant est toujours activé ($\eta_k^M = \text{actif}$) et la direction de contournement préférentielle dépend de la vitesse angulaire :

$$T_k^M = \begin{cases} \text{horaire} & \omega_k^{ref} < 0 \\ \text{antihoraire} & \omega_k^{ref} > 0 \\ \text{nulle} & \omega_k^{ref} = 0 \end{cases} \quad (6.5)$$

6.4 Expérimentations

En premier lieu, des exemples de courbes caractéristiques et de trajectoires liées à différents scénarios sont illustrés. Un passage d'une porte entrouverte est ensuite réalisé. Le dernier exemple démontre un passage plus complexe nécessitant l'intervention répétée de stratégies alternatives de l'assistant.

6.4.1 Extraction de la courbe caractéristique et du chemin

Cette sous-section présente, à la figure 6.8, les courbes caractéristiques et les trajectoires obtenues selon différents scénarios. Ces courbes permettent de localiser un passage plausiblement recherché, étant donné la pose relative de la plate-forme lors de la requête. Les trajectoires paraissent également convenables.

Cet exemple illustre le fait que la méthodologie permet d'identifier et de s'adapter aux passages sans égard à leurs configurations précises. Puisqu'aucune connaissance à priori de l'environnement n'est requise, l'approche s'applique à une infinité de configurations de passages. Ceci élargit son

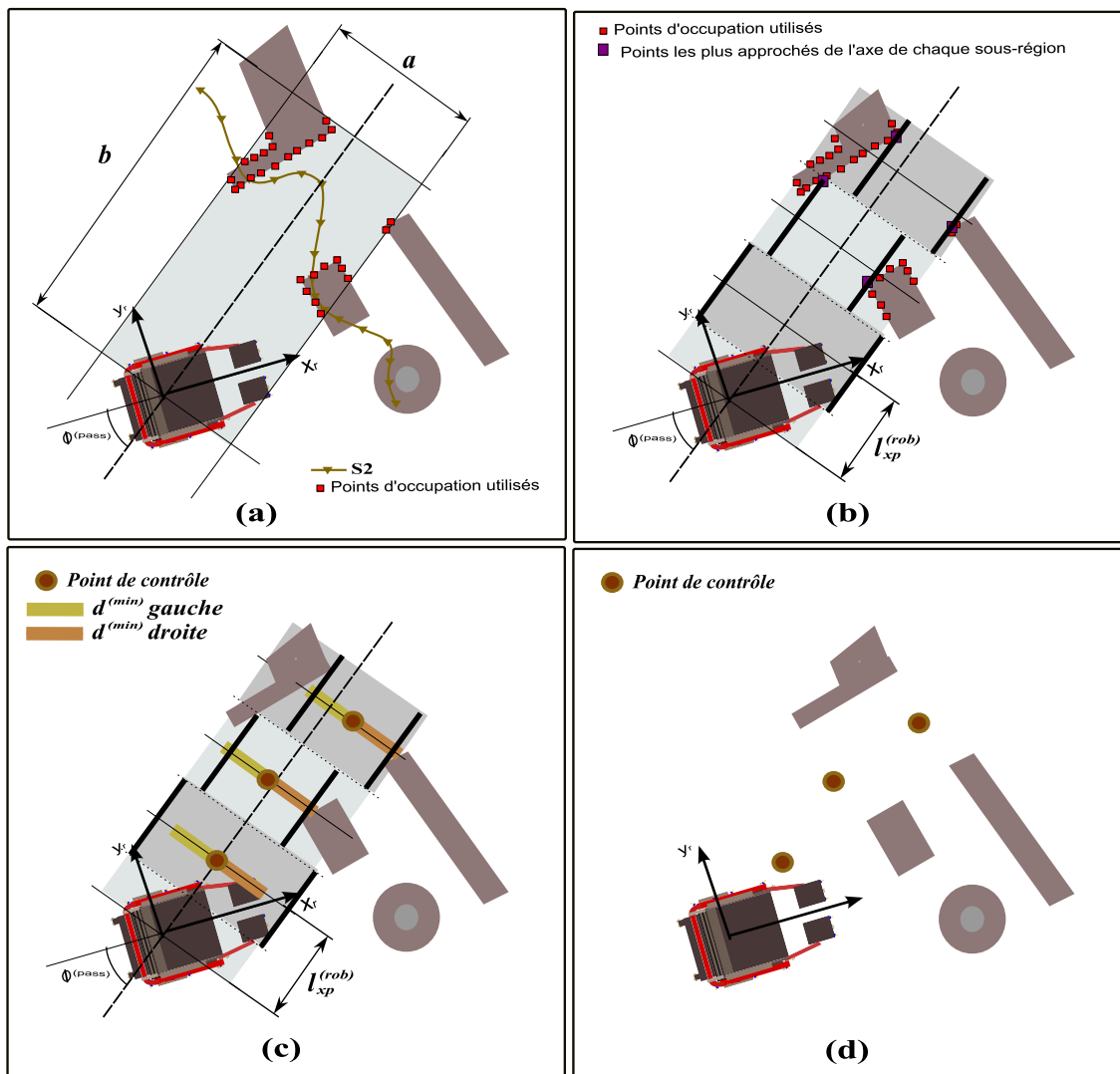


Figure 6.6 Évaluation de la trajectoire utile au passage de porte : (a) obtention des points d'occupation considérés ; (b) division de la région en zones et obtention des points critiques gauche-droit pour chaque zone ; (c) évaluation de la séquence de points de passage ; (d) séquence de points de passage conséquente.

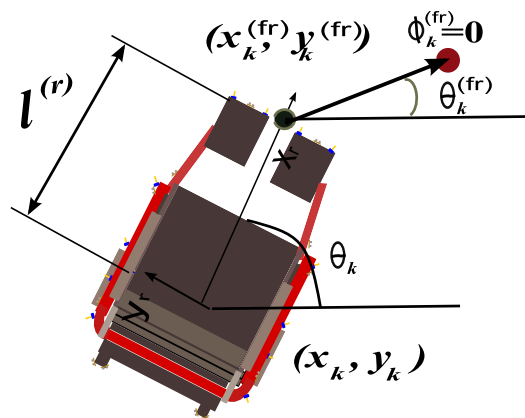


Figure 6.7 Pose utilisée dans la méthode de suivi de séquence de points.

champ d'applicabilité par rapport aux approches basées sur la reconnaissance de passages précis (Kim et Nevatia, 1998), (Simmons *et al.*, 2003), (Eberst *et al.*, 2000), (Monasterio *et al.*, 2002), (Muñoz-Salinas *et al.*, 2006), (Cicirelli *et al.*, 2003), (Angelov *et al.*, 2004).

6.4.2 Exécution d'un passage

On présente ici un exemple d'exécution d'un passage étroit, réalisé en simulation sous Acropolis (voir chapitre 5). La trajectoire obtenue, à la figure 6.11, est légèrement courbée afin de contourner la porte entrouverte. L'assistant à l'évitement de collision assure des vitesses d'approche sécuritaires (voir figure 6.12), lesquelles diminuent à l'approche du passage et augmentent suite à la traversée. En somme, la traversée est fluide et sécuritaire.

6.4.3 Exécution d'un passage à l'aide de stratégies de déblocage

Cet exemple illustre une situation plus difficile exigeant la prise en considération exacte de la géométrie de la plate-forme en relation avec les obstacles environnants. Les stratégies de déblocages de l'assistant sont donc nécessaires au succès de la traversée. La figure 6.11 illustre l'évolution spatiale de la plate-forme et la figure 6.12 présente les vitesses correspondantes ainsi que les stratégies sélectionnées par l'assistant. En (a), l'approche vers le premier point de la trajectoire s'effectue jusqu'à ce que la partie droite du portique bloque l'évolution. Une stratégie à gauche est alors adoptée jusqu'à ce que la commande maîtresse puissent être réappliquée en (c). En (d), la commande maîtresse causerait, en pivotant vers la droite, une collision dans le portique de droite situé légèrement devant l'axe des roues : la stratégie d'avancer est alors adoptée par l'assistant. En (e), une stratégie avant-droite permet de vaincre l'impasse. La commande maîtresse est ainsi réappliquée jusqu'à ce que l'obstacle circulaire de gauche bloque le coin supérieur gauche de la

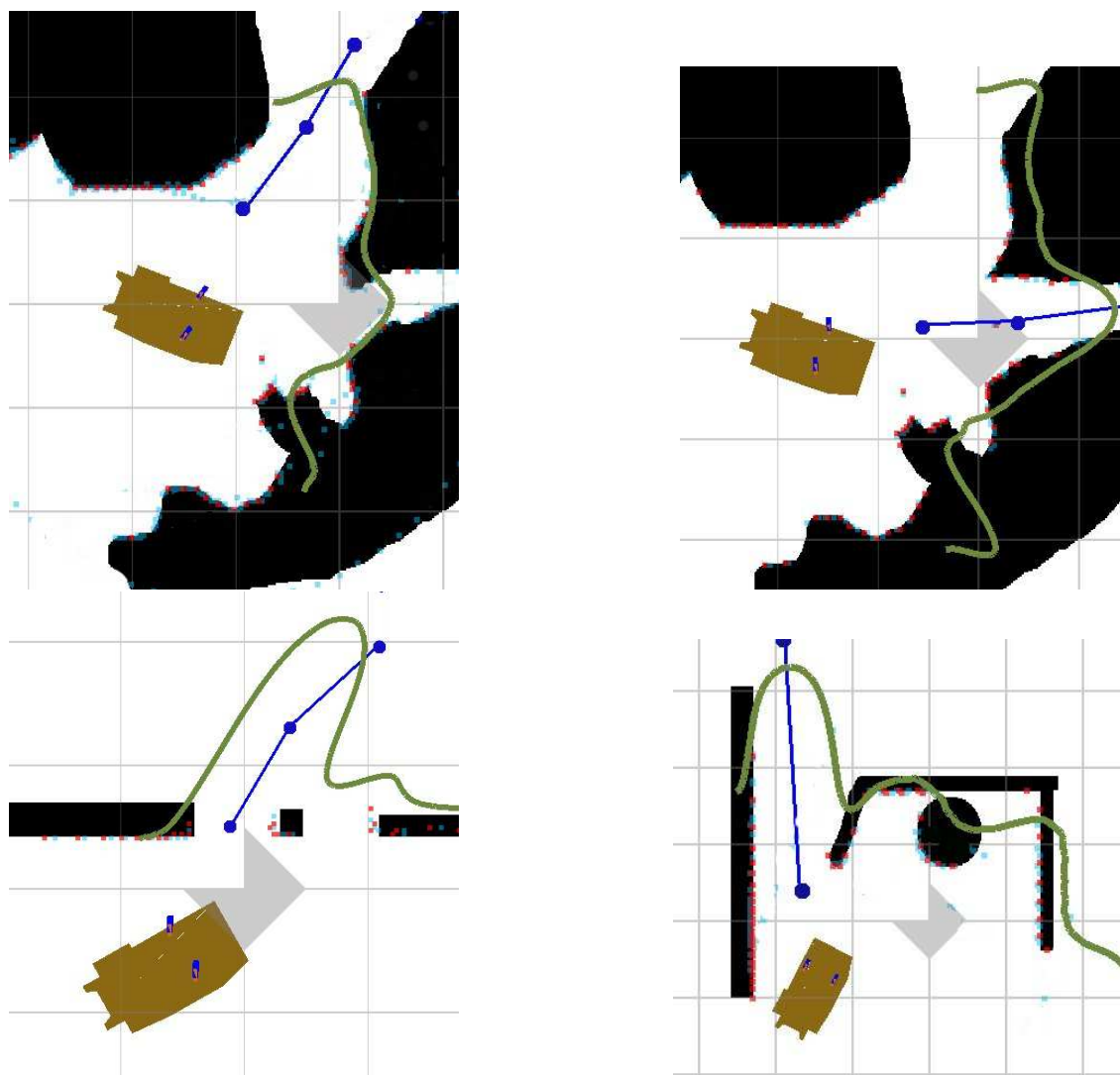


Figure 6.8 Exemples d'extraction de courbes caractéristiques et de trajectoires pour différents scénarios.

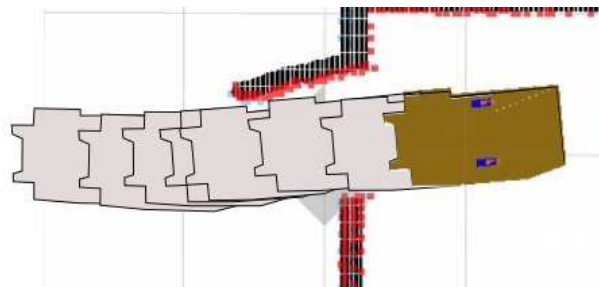


Figure 6.9 Passage d'une porte entrouverte.

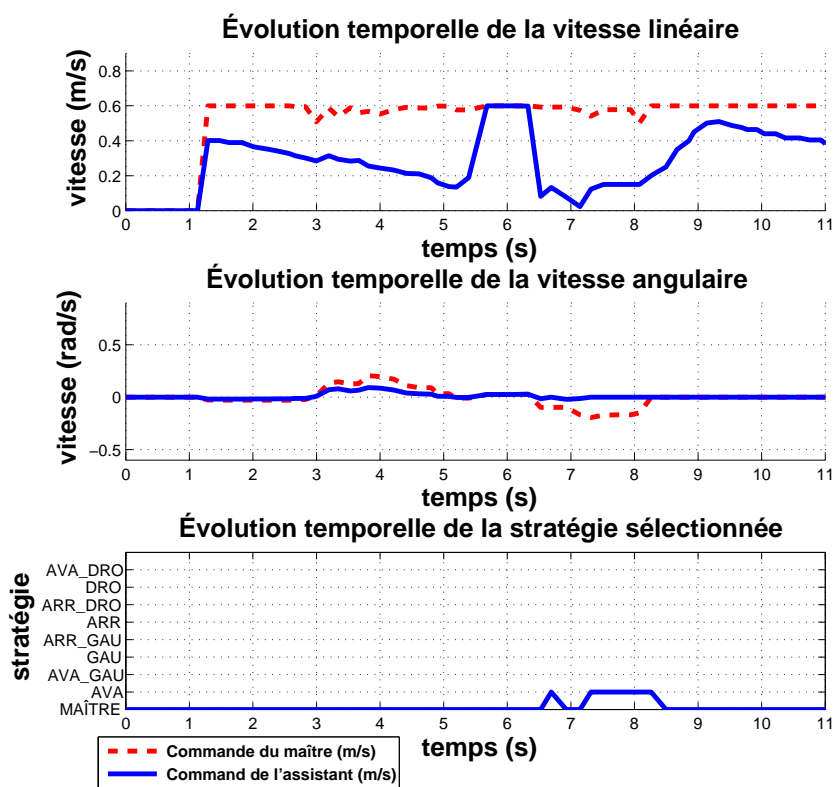


Figure 6.10 Évolution des vitesses lors du passage d'une porte entrouverte.

plate-forme. La stratégie avant-droite permet alors la poursuite en (f), suivie par la commande maîtresse en (g). En somme, il apparaît que la collaboration entre le module de traversée et l'assistant a produit un déplacement fluide (voir l'évolution des vitesses commandées) et efficace (aucune redondance du choix des mouvements, lesquels provoquent toujours la progression de la tâche). Fait intéressant, ce comportement relativement complexe est obtenu de manière implicite par la réaction de l'assistant et est ainsi toujours adapté au contexte courant sans égard aux perturbations dynamiques, lesquelles troubleraient normalement la réalisation d'une planification obtenue à priori (Nagatani et Yuta, 1993), (Irie *et al.*, 2003), (Pepy et Lambert, 2006), (Kavraki *et al.*, 1996), (Hsu *et al.*, 1998), (Hsu *et al.*, 2003), (Sun *et al.*, 2005), (Wang et Li, 2009) et (Kavraki *et al.*, 1996).

6.5 Conclusion

Ce chapitre a introduit une approche permettant l'identification et la réalisation de passages étroits. Les nombreuses expériences réalisées tant en simulation que sur une plate-forme réelle (comme nous le verrons au chapitre 10) confirment son efficacité. Étant donné sa capacité à gérer efficacement et sécuritairement des passages très étroits et variés, cette méthode apparaît intéressante pour des applications commerciales, telles que les fauteuils roulants semi-autonomes.

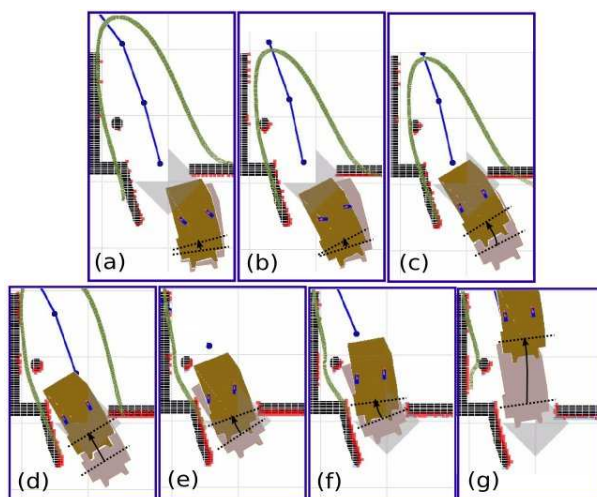


Figure 6.11 Réalisation d'un passage exigeant l'intervention de stratégies de déblocage.

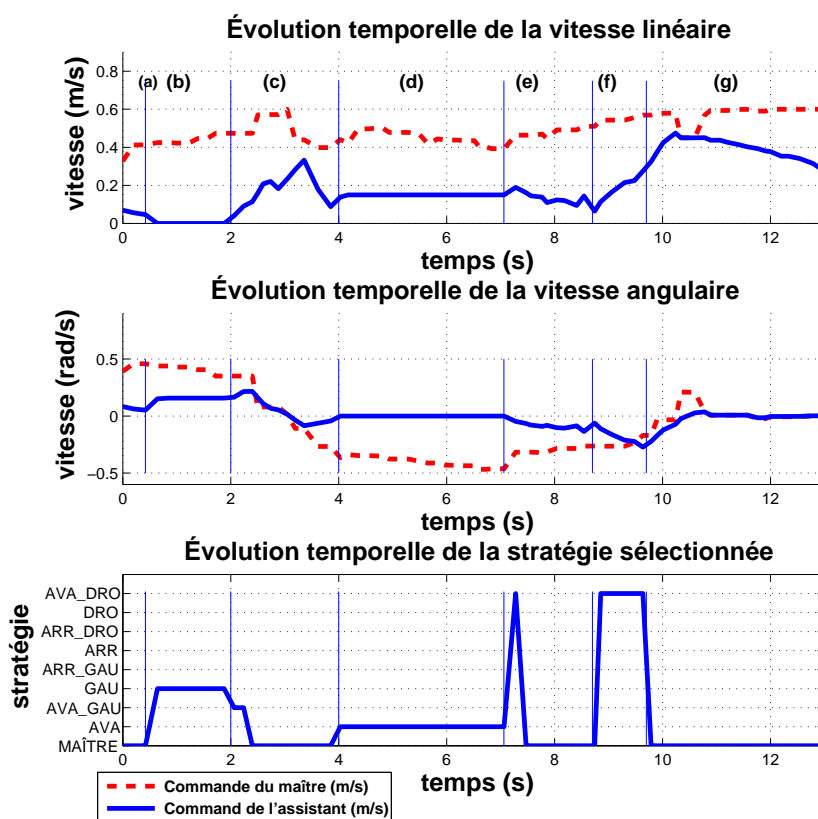


Figure 6.12 Évolution des vitesses lors du passage exigeant l'intervention de stratégies de déblocage.

CHAPITRE 7

MANOEUVRE ÉVOLUÉE 2 : STATIONNEMENT

7.1 Introduction

En environnements restreints, les manoeuvres de stationnement peuvent nécessiter de nombreux mouvements précis consécutifs exigeant une dextérité et une attention considérables pour un usager souffrant d'incapacités motrices ou psychologiques. Le stationnement autonome, communément assuré par des systèmes dits réactifs ou basés sur une planification à priori, vise à alléger ces efforts tout en augmentant l'efficacité et la sécurité de la manoeuvre.

En pratique, le stationnement d'une plate-forme mobile est réalisé près des obstacles et doit donc s'adapter aux contraintes spatiales imposées par ces obstacles. La manière de prendre en considération les obstacles dans la stratégie de stationnement constitue le principal enjeu des approches récentes (Paromtchik *et al.*, 1996), (Jiang et Seneviratne, 1999), (Baturone *et al.*, 2004), (Lee *et al.*, 2009), (Demirli et Khoshnejad, 2009).

L'approche réactive, telle que réalisée par Paromtchik *et al.* (1996), a l'avantage de fournir une commande toujours appropriée malgré les perturbations dynamiques (glissements, réponse dynamique inexacte, environnement en évolution)¹. De manière plus courante, le problème de stationnement est abordé par la planification de trajectoires successives devant être parcourues jusqu'à la cible. En environnement encombré, ces trajectoires doivent tenir compte des obstacles (Barraquand et Latombe, 1989), (Lamiriaux et Lammond, 2001), (Laumond *et al.*, 1994), (Latombe, 1991), (Ferbach, 1998). Cependant, la prise en compte des obstacles dans l'évaluation d'une trajectoire appropriée peut impliquer, par la non-linéarité du problème, une évaluation itérative de diverses solutions parmi un très large éventail. Bien que cette évaluation puisse être simplifiée lorsque la géométrie de la plate-forme et des obstacles reste simple (Jiang et Seneviratne, 1999), elle demeure néanmoins d'autant plus critique en temps de traitement qu'elle doit se répéter fréquemment pour s'adapter aux perturbations dynamiques. Afin d'éviter ces planifications répétées, la trajectoire suivie peut être modulée par une logique floue intégrant des mesures sensorielles de l'environnement (Baturone *et al.*, 2004), (Demirli et Khoshnejad, 2009), (Lee *et al.*, 2009). Ces règles floues, typiquement optimisées en fonction de l'expérience de conducteurs expérimentés, visent une bonne interaction entre l'objectif d'évitement de collision, de planification et de suivi de la trajectoire. Puisque ces règles varient selon la configuration des capteurs de proximité, la géométrie de la plate-forme, l'en-

¹Cette approche suppose toutefois l'absence d'objets latéraux aux abords du stationnement, ce qui limite son applicabilité.

combement du stationnement et l'entraînement du système : l'adaptation de ces approches à des contextes diversifiés s'avère toutefois difficile.

Pour une meilleure applicabilité, la méthode introduite dans ce chapitre est conçue de manière à fonctionner sur diverses plates-formes en environnements inconnus et variés. Le caractère multi-plateformes est attribuable à l'architecture de contrôle du chapitre 5, laquelle comporte une plate-forme virtuelle fournissant une information indépendante de la configuration matérielle. La capacité d'adaptation à des lieux variés est offerte par la stratégie de stationnement proposée, laquelle permet une atteinte précise de la pose ciblée en la réévaluant périodiquement (un point important pour compenser l'effet des glissements affectant la localisation). L'efficacité de la navigation en lieux restreints repose sur une coopération avec l'assistant stratégique présenté au chapitre 4 et la fluidité des mouvements est assurée par les lois cinématiques du contrôleur de suivi de séquence de points du chapitre 3.

L'exposé du problème de stationnement est présenté à la section 7.2, suivi par la technique de construction et d'actualisation de la pose cible à la section 7.3 et de la méthode de stationnement proposée à la section 7.4. Les expérimentations sont finalement présentées à la section 7.5.

7.2 Exposé du problème

Le problème de stationnement est illustré à la figure 7.2. Il consiste à amener une plate-forme mobile d'une pose initiale $\{x_0, y_0, \theta_0\}$ à une pose cible $\vec{v}^{(sta)} = \{x^{(sta)}, y^{(sta)}, \theta^{(sta)}\}$ traversant une droite $D^{(sta)}$. La pose cible est évaluée à partir de la commande de stationnement $C^{(sta)} = \{dir^{(sta)}, d^{(sta)}\}$, laquelle comporte une direction logique $dir^{(sta)} = \{gauche, droite, avant, arrière\}$ et une distance de séparation cible $d^{(sta)}$ avec les obstacles en cette direction.

Lorsque l'arrière et l'avant de la pose cible sont dégagés, la position longitudinale $\{x^{(sta)}, y^{(sta)}\}$ est telle que l'angle entre le segment la reliant au point de giration de la plate-forme et la droite $D^{(sta)}$ soit de 90 degrés, comme il est illustré à la figure 7.1. Si l'arrière ou l'avant est encombré, la pose cible peut être déplacée le long de la droite $D^{(sta)}$ pour que l'espace soit suffisant entre la plate-forme et les obstacles. La distance minimale entre le périmètre de la plate-forme et les obstacles est fixée à $d_{lim}^{(obs)}$.

La pose de la plate-forme, relativement à la pose cible, se caractérise par les paramètres suivants :

- $d_k^{(per)}$: distance entre la plate-forme et la droite de stationnement $D^{(sta)}$ (définie positive) ;
- $d_k^{(para)}$: composante, parallèle à la droite $D^{(sta)}$, du vecteur liant le point de giration de la plate-forme à la position cible $\{x^{(sta)}, y^{(sta)}\}$;
- $\phi_k^{(sta)}$: angle minimal entre la droite $D^{(sta)}$ et l'orientation θ_k de la plate-forme, avec $\phi_k^{(sta)} = \theta^{(sta)} - \theta_k$, où $\phi_k^{(sta)} \in [-\pi/2, \pi/2]$;

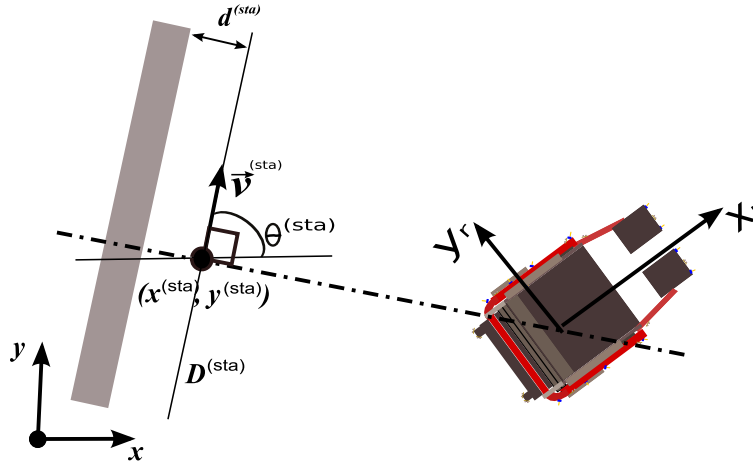


Figure 7.1 Illustration de la pose cible $\vec{v}^{(sta)} = \{x^{(sta)}, y^{(sta)}, \theta^{(sta)}\}$ pour un stationnement à gauche.

- $face_k^{(sta)}$: direction de la cible relativement à la pose de la plate-forme. On a $face_k^{(sta)} = 1$ si la cible est positionnée devant la plate-forme (selon un angle compris entre $-\pi/2$ et $\pi/2$) et $face_k^{(sta)} = -1$ sinon.

La direction des obstacles au côté desquels la plate-forme doit être stationnée est notée $cote_k^{(obs)}$ et comprend comme possibilités *gauche* ou *droite*.

Certaines circonstances imposent de limiter la zone d'opération du stationnement malgré que l'espace libre soit suffisant. Ceci s'avère nécessaire, par exemple, si une voie de circulation se trouve le long de la droite de stationnement $D^{(sta)}$. La distance maximale, parallèle à la droite $D^{(sta)}$, entre la plate-forme et la cible $\{x^{(sta)}, y^{(sta)}\}$ est fixée à $d_{max}^{(sta)}$.

La pose cible est jugée atteinte lorsque l'écart de positionnement est inférieur à un seuil $\epsilon^{(para)}$ selon la direction parallèle à la droite $D^{(sta)}$, à un seuil $\epsilon^{(per)}$ selon sa direction transversale et à un seuil $\epsilon^{(\phi)}$ selon son orientation. On suppose que le stationnement est réalisable si l'espace de stationnement permet à la plate-forme de s'y introduire en effectuant des déplacements longitudinaux (avant/arrière) et angulaires (gauche/droite).

7.3 Pose cible liée à la commande de stationnement

7.3.1 Évaluation de la pose cible

La pose de la droite de stationnement $\{x^{(sta)}, y^{(sta)}, \theta^{(sta)}\}$ est obtenue en conséquence de la commande de stationnement $C^{(sta)}$ introduite à l'exposé du problème. Son évaluation est réalisée en cinq étapes énoncées ci-dessous.

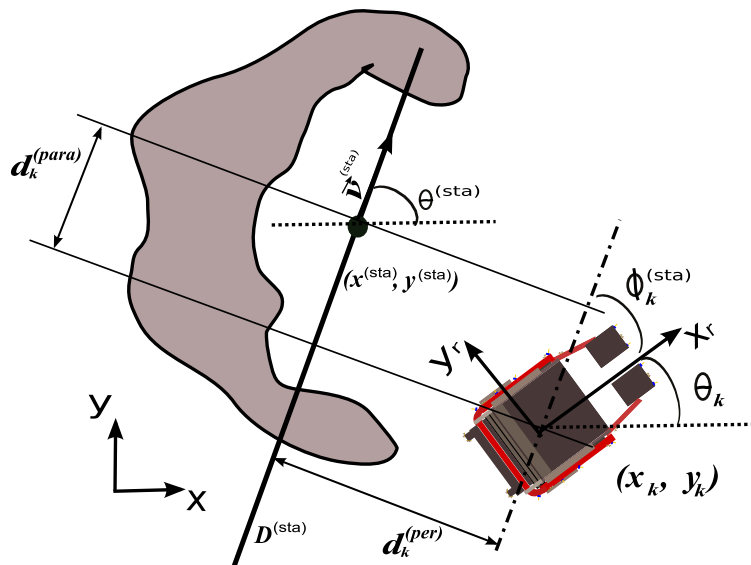


Figure 7.2 Illustration du problème de stationnement.

Étape 1 - Acquisition des points d'occupation L'objectif est d'obtenir le groupe de points dans la direction de stationnement $dir^{(sta)}$, tel qu'illustré à la figure 7.3. Le groupe de points extrait est noté $Q = \{q_j, j = 1, \dots, M\}$.

Étape 2 - Sélection des points d'intérêt Le problème de sélection des points est illustré à la figure 7.4 (a). Comme la distance de stationnement $d^{(sta)}$ est seulement relative aux premiers obstacles contraignant le mouvement, il importe de conserver seulement les points de Q issus de ces obstacles, formant le groupe $Q^* = \{q_z, z = 1, \dots, M^*\}$. Ceux-ci permettront le calcul de la droite d'obstacle $D^{(obs)}$ à partir de laquelle la plate-forme doit être stationnée. On calcule la distance d_j entre chaque point q_j et l'axe des x pour un stationnement gauche-droite ; et l'axe des y pour un

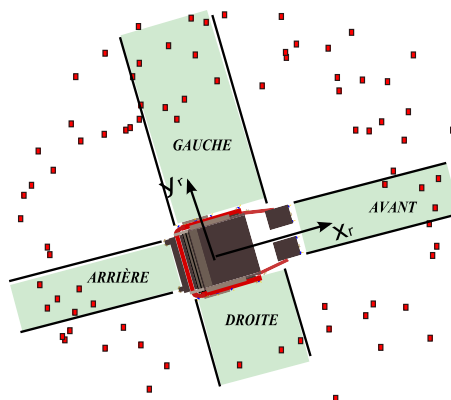


Figure 7.3 Première sélection des points pour construire la droite d'obstacle.

stationnement avant-arrière. On classe ensuite les points par ordre croissant de distance, de sorte que $d_{j-1} < d_j \forall j = 2, \dots, M$. En prenant par défaut les trois premiers points, on insère itérativement chaque point subséquent pour autant que sa distance d_j soit inférieure à la limite supérieure de contrôle :

$$LSC = \overline{d_{1,j-1}} + 3\sigma_{1,j-1} \quad (7.1)$$

où $\overline{d_{1,j-1}}$ est la moyenne du groupe de distances comprenant d_1 à d_{j-1} et $\sigma_{1,j-1}$ sa variance². Puisqu'on s'intéresse seulement aux points des premiers obstacles, l'insertion termine dès qu'un point est rejeté.

Étape3 - Extraction de la droite sur les obstacles La droite de régression linéaire $D^{(obs)}$ traversant les premiers obstacles passe par le point $\{x^{(obs)}, y^{(obs)}\} = \{\overline{q_{zx}}, \overline{q_{zy}}\}$ et a pour orientation³ :

$$\theta^{(obs)} = \begin{cases} \text{atan2} \left(\frac{\overline{q_{zx}q_{zy}} - \overline{q_{zx}} \cdot \overline{q_{zy}}}{\overline{q_{zx}^2} - \overline{q_{zx}}^2} \right) & \text{si } \left| \overline{q_{zx}^2} - \overline{q_{zx}}^2 \right| > \left| \overline{q_{zy}^2} - \overline{q_{zy}}^2 \right| \\ \pi/2 - \text{atan2} \left(\frac{\overline{q_{zx}q_{zy}} - \overline{q_{zx}} \cdot \overline{q_{zy}}}{\overline{q_{zy}^2} - \overline{q_{zy}}^2} \right) & \text{sinon} \end{cases} \quad (7.2)$$

Un exemple de droite est illustré sur la figure 7.4 (b) pour un stationnement à gauche.

Étape4 - Première estimée de la pose et de la droite de stationnement La droite de stationnement $D^{(sta)}$ est parallèle à $D^{(obs)}$ et est située à une distance $d^{(sta)}$ de cette dernière, en direction de la plate-forme. La position de stationnement $\{x^{(sta)}, y^{(sta)}\}$ se situe à l'intersection de la droite de stationnement $D^{(sta)}$ et du segment liant la plate-forme au point qui lui est le plus rapproché sur la droite d'obstacle $D^{(obs)}$.

Étape5 - Correction de la position cible selon l'espace libre La position de la cible doit parfois être corrigée pour être atteignable. Or, cette correction tient compte des obstacles devant et derrière la cible, auxquels est associée une droite résumant leurs positions et orientations. La figure 7.5 présente l'extraction des droites d'obstacles devant et derrière la cible, soient $D^{(av)}$ et $D^{(ar)}$, lesquelles sont évaluées à l'aide des étapes 1 à 4 décrites précédemment. Pour l'étape 1, l'ensemble Q comprend les points situés dans une région de largeur⁴ correspondant à celle de la plate-forme ($l_y^{(rob)}$). L'intersection entre les droites avant $D^{(av)}$ et arrière $D^{(ar)}$ et la droite de stationnement $D^{((sta))}$ produit les points $q^{(av)}$ et $q^{(ar)}$, à partir desquels les distances libres avant $d^{(av)}$ et arrière $d^{(ar)}$ sont

²Notez que ce principe est employé pour le contrôle de la qualité.

³L'expression 7.2 permet une bonne précision pour l'ensemble des orientations, incluant celles s'approchant ou égales à $\pi/2$.

⁴En pratique, il est préférable de choisir une largeur légèrement inférieure à $l_y^{(rob)}$ afin de réduire les risques d'inclure dans l'ensemble Q des points pouvant être facilement contournés lors de l'exécution de la manoeuvre. En contrepartie, cela peut faire en sorte qu'un stationnement non réalisable soit entrepris.

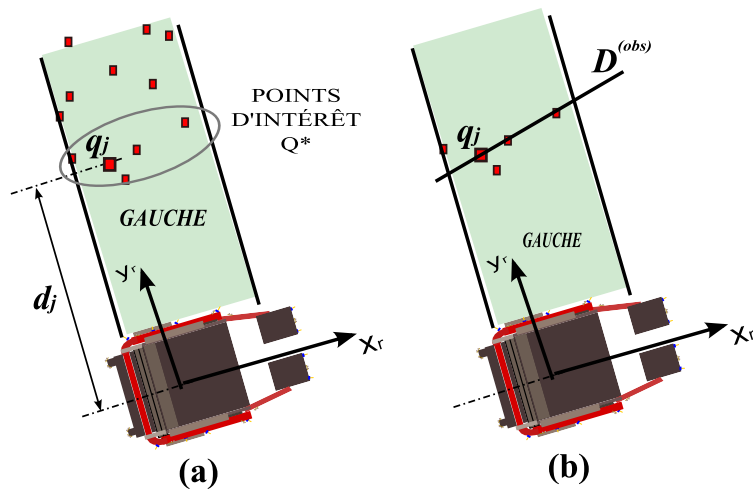


Figure 7.4 Sélection des points d'intérêt Q^* pour un stationnement à gauche (a) et construction de la droite d'obstacle $D^{(obs)}$ en (b). Les points d'intérêt appartiennent aux premiers obstacles contraignant le mouvement.

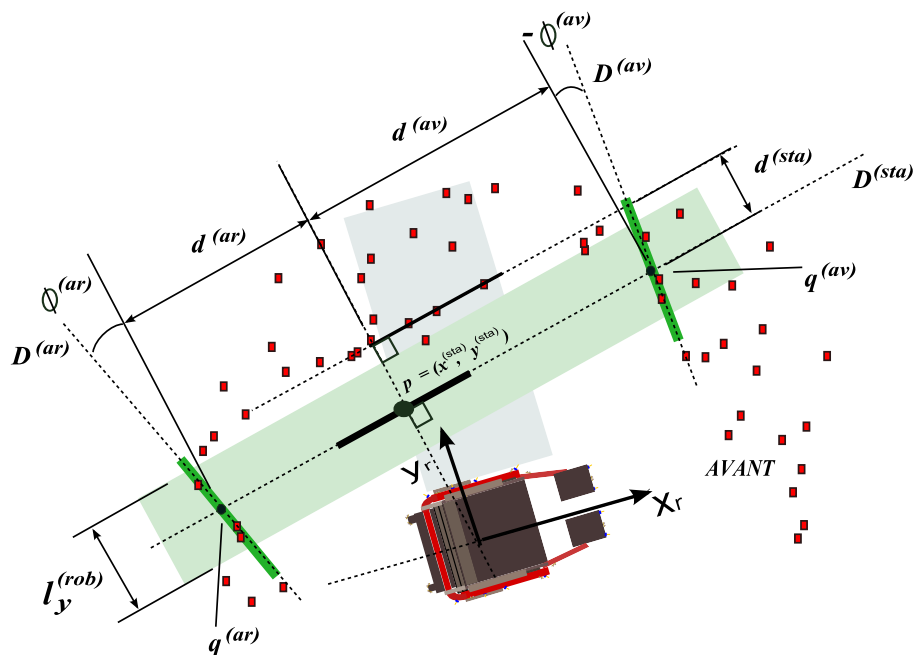


Figure 7.5 Détermination des droites d'obstacles devant et derrière la cible.

obtenues en fonction de la position de stationnement $\{x^{(sta)}, y^{(sta)}\}$. Dès lors, la pose cible de l'étape 3 peut être déplacée le long de la droite de stationnement de manière à ce que les distances libres soient suffisantes : $l_{xp}^{(rob)} < d^{(av)}$ et $l_{xn}^{(rob)} < d^{(ar)}$. Si ce n'est pas possible, alors le stationnement est jugé non réalisable et n'est pas entrepris.

7.3.2 Actualisation de la pose cible

L'actualisation de la pose cible vise à augmenter la robustesse vis-à-vis l'erreur de localisation de la plate-forme. La procédure d'actualisation s'apparente à celle de la construction, à quelques différences près :

- À l'étape 1 : la position de référence n'est pas la pose courante de la plate-forme, mais demeure celle utilisée au moment de la première construction, soit $\{x_0, y_0, \theta_0\}$;
- À l'étape 2 : les distances d_j correspondent à celles entre les points q_j et la droite d'obstacle initiale $D_0^{(obs)}$;
- À l'étape 5 : la position cible est déplacée sur $D^{(sta)}$ de manière à minimiser l'écart (au sens des moindres carrés) avec les distances initiales *utilisables* parmi $d_0^{(ar)}$ et $d_0^{(av)}$. Une distance est jugée utilisable si elle est inférieure à une distance maximale, comporte un écart angulaire $\left(\left| \phi_0^{(ar)} \right| \quad \text{ou} \quad \left| \phi_0^{(av)} \right| \right)$ inférieur à un seuil et que le nombre de points utilisés pour construire la droite $\left(D_0^{(ar)} \quad \text{ou} \quad D_0^{(av)} \right)$ est suffisant (supérieur à un seuil).

7.4 Stratégie de stationnement

Le module de stationnement définit la stratégie maîtresse $S_k^M = \{v_k^M, \omega_k^M, w_k^M, T_k^M\}$ à chaque instant k et utilise les distances exemptes d'obstacle devant et derrière la plate-forme $\{d_B^{(avEC)}, d^{(arEC)}\}$ qui sont fournies par l'assistant stratégique.

Le stationnement comprend plusieurs opérations dont l'agencement est décrit par la machine à états représentée à la figure 7.6. Cette machine génère les vitesses menant la plate-forme à s'aligner avec la droite de stationnement, en mode avant et arrière, jusqu'à ce qu'elle atteigne la pose cible. Un pivotement préparatif est effectué avant chaque alignement afin de bien débiter l'opération.

Manoeuvre d'alignement avant et arrière L'évaluation des vitesses $\{v_k^M, \omega_k^M\}$ réalisant l'alignement avec la droite $D^{(sta)}$ est effectuée à l'aide des lois de contrôle linéaire 3.5 et angulaire 3.1, soient $v_{i,k}^*(\phi_k^{(att)}, m_k, d_k, 0)$ et $\omega_{i,k}^*(\phi_k^{(att)})$, utilisées lors du suivi de segments au chapitre 3 où l'écart d'orientation $\phi_k^{(att)}$, donnée par l'équation (3.8), vise l'atterrissage sur la droite. Le mode de déplacement m_k correspond au mode d'alignement ($m_k = 1$ pour un alignement vers l'avant et $m_k = -1$ pour un alignement vers l'arrière). La distance résiduelle d_k varie selon la pose relative de la cible. Si la distance transversale de la cible $d_k^{(per)}$ satisfait la précision recherchée ($d_k^{(per)} \leq \epsilon^{(per)}$), alors

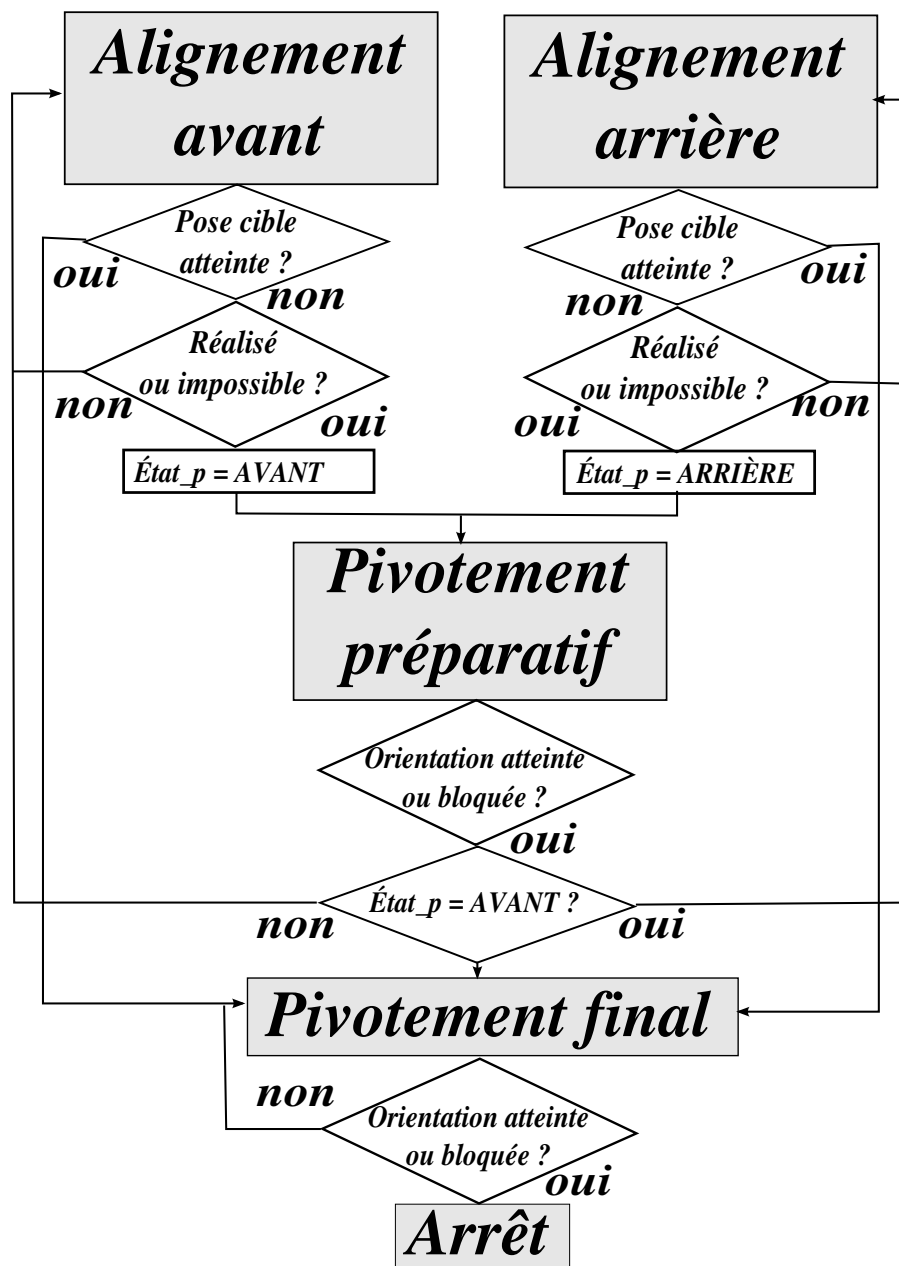


Figure 7.6 Machine à état responsable du stationnement.

l'arrêt sur la cible est prévu si la plate-forme s'en rapproche. Autrement, la plate-forme s'arrêtera à la distance maximale de la cible $d_{max}^{(sta)}$ avant de changer de mode. Ainsi, la distance résiduelle d_k est donnée par :

$$d_k = \begin{cases} d_k^{(para)} & (face_k^{(sta)} = m_k) \text{ et } \left(d_k^{(per)} \leq \varepsilon^{(per)} \right) \\ d_k^{(para)} + d_{max}^{(sta)} & (face_k^{(sta)} = m_k) \text{ et } \left(d_k^{(per)} \geq \varepsilon^{(per)} \right) \\ d_{max}^{(sta)} - d_k^{(para)} & \text{sinon} \end{cases} \quad (7.3)$$

Le mode stratégique du module d'évitement d'obstacle est activé pour permettre l'évolution avec la présence d'obstacles : $\eta_k^M = \text{actif}$. Le point visé w_k^M pour l'objectif de transfert spatial correspond à la position de stationnement $\{x^{(sta)}, y^{(sta)}\}$. La direction privilégiée de contournement d'obstacle T_k^M dépend de la direction latérale de la droite d'obstacle $D^{(obs)}$ relativement à la plate-forme. Cette direction est définie par :

$$T_k^M = \begin{cases} \text{horaire} & \left(cote_k^{(obs)} = \text{gauche et } m_k = 1 \right) \\ \text{ou } \left(cote_k^{(obs)} = \text{droite et } m_k = -1 \right) \\ \text{antihoraire} & \text{sinon} \end{cases} \quad (7.4)$$

À la figure 7.7, on remarque par inspection que cette règle facilite l'évolution de la manoeuvre en provoquant une réaction toujours cohérente aux opérations subséquentes. En (a), alors que les obstacles se situent à la droite de la plate-forme, une réaction en sens antihoraire lui permet de progresser vers la droite de stationnement. À l'approche du mur frontal, une réaction toujours en sens antihoraire est cohérente au pivotement préparatif requis avant d'entamer le mode d'alignement arrière. Ce raisonnement est symétrique lorsque les obstacles se trouvent à gauche de la plate-forme et s'équivaut pour le mode d'alignement arrière en (b).

Les transitions d'un mode d'alignement vers un second mode surviennent lorsque l'objectif

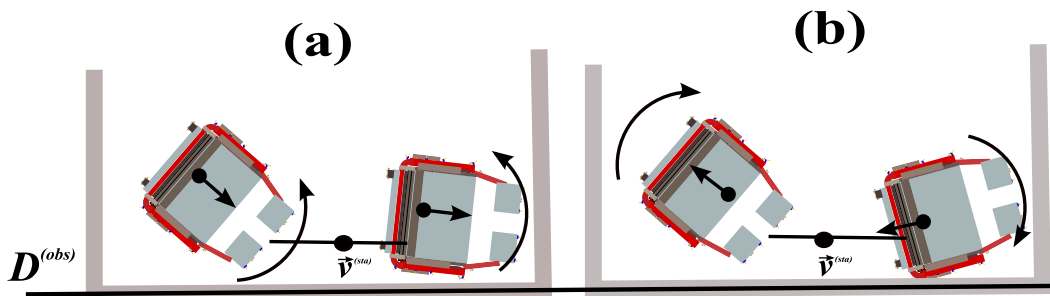


Figure 7.7 Illustration de la réaction préférentielle de contournement pour un alignement avant (a) et arrière (b), lorsque les obstacles sont à droite.

de l'alignement est réalisé ou lorsque la progression dans ce mode n'est plus possible. L'objectif premier étant d'atteindre la cible, un transfert vers le *pivotement final* surviendra dès que la position de la cible est atteinte, ce qui implique que $d_k^{(para)} \leq \epsilon^{(para)}$ et $d_k^{(per)} \leq \epsilon^{(per)}$.

Si la cible ne peut être atteinte durant l'opération d'alignement courante, alors l'objectif est simplement de se rapprocher de la droite de stationnement pour en faciliter les opérations successives. Dans ce cas, un transfert vers le mode de pivotement préparatif survient dès que le rapprochement de la droite est suffisant ou que la progression est impossible. Plus précisément, le rapprochement est satisfait si la cible se situe dans la direction opposée à celle du déplacement ($face_k^{(sta)} = -m_k$) et qu'une des deux conditions suivantes est satisfaite :

1. sa distance avec la droite d'alignement est suffisamment faible ($d_k^{per} \leq \epsilon^{(per)}$)
2. la distance maximale de la cible est atteinte ($d_k^{(para)} \geq d_{max}^{(sta)}$).

Le rapprochement est jugé impossible si la distance libre dans la direction du déplacement, soit d^{avEC} pour un déplacement avant et d^{arEC} pour un déplacement arrière, est inférieure à la limite $d_{lim}^{(obs)}$.

Pivotement préparatif L'objectif du pivotement préparatif est d'orienter la plate-forme selon l'angle d'atterrissage $\phi_k^{(att)}$ visé lors de l'initiation de la manoeuvre d'alignement consécutive, ce qui assure un rapprochement vers la droite dès le début de l'opération. La vitesse angulaire est donnée par l'équation (3.1) avec $\omega_{i,k}^*(\phi_k^{(att)})$ et la vitesse linéaire est nulle. Le mode stratégique est activé durant cet état ($\eta_k^M = actif$) et la direction privilégiée correspond à celle utilisée au mode subséquent, donnée par l'équations 7.4.

Pivotement final Lorsque la pose cible est atteinte, un pivotement final est effectué pour améliorer la précision de l'orientation avant de passer à l'arrêt. La vitesse angulaire est donné par l'équation (3.1) avec $\omega_{i,k}^*(\phi_k^{(sta)})$. Le mode stratégique est désactivé durant cet état ($\eta_k^M = inactif$). L'arrêt survient dès que l'orientation est suffisamment précise ($\phi_k^{(sta)} \leq \epsilon^{(\phi)}$) ou que le pivotement est bloqué.

7.5 Expérimentation

Le fonctionnement de l'approche de stationnement est décrit par un exemple réalisé en simulation. Les tests réels effectués dans le cadre du projet de FRMSA seront discutés dans la section des expérimentations du mémoire.

7.5.1 Simulation

Un exemple de stationnement en parallèle est réalisé à la figure 7.8. La figure 7.9 présente l'évolution temporelle des états du stationnement, des vitesses et des stratégies de l'assistant. La manoeuvre débute en (a) en mode d'alignement arrière. Au moment où l'obstacle bloque la progression, le mode de pivotement préparatif est activé, en (b), et se poursuit jusqu'à l'atteinte de l'angle d'atterrissage. Le mode d'alignement avant est alors activé en (c). Lorsque le mur de gauche bloque la progression de l'alignement, la stratégie alternative avant-droite est sélectionnée par l'assistant en (d) en même temps que l'état de pivotement préparatif intervient, lequel se poursuit en (e). Dès que l'orientation visée est obtenue, le mode d'alignement arrière s'active en (f), suivi en (g) par un pivotement préparatif à un dernier alignement avant qui permet, cette fois-ci, une proximité suffisante avec la cible. L'état de pivotement final n'a presque qu'aucun effet dans ce cas, puisque la plate-forme est déjà bien orientée au moment de l'atteinte de la cible.

7.6 Conclusion

Ce chapitre a introduit une méthode de stationnement apte à opérer en environnements dynamiques variés. L'efficacité de la stratégie sera vérifiée par les nombreux tests réalisés dans le cadre du projet de FRMSA et confirmée par les usagers ayant utilisé la fonctionnalité.

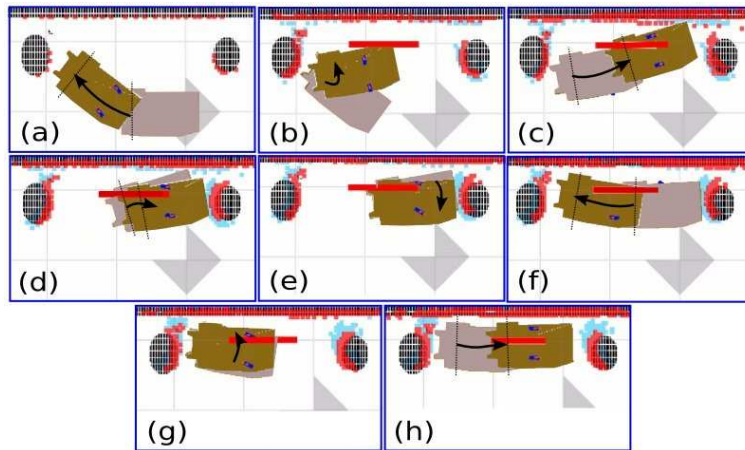


Figure 7.8 Exemple de stationnement en parallèle.

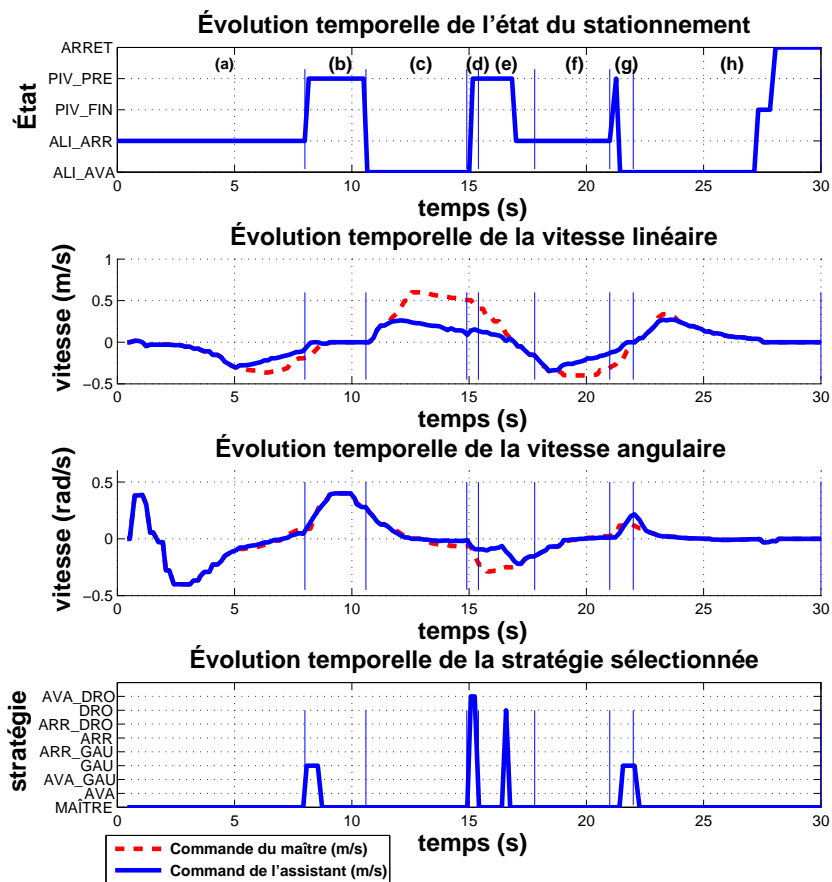


Figure 7.9 Évolution temporelle des états, des vitesses et des stratégies d'assistance.

CHAPITRE 8

AUTOLOCALISATION D'UNE PLATE-FORME MOBILE EN ENVIRONNEMENT PARTIELLEMENT DYNAMIQUE

8.1 Introduction

La navigation automatique d'une plate-forme mobile exige que cette dernière connaisse, en tout temps, sa pose relativement à celles de ses destinations. Dans cette perspective, ce chapitre propose une méthode d'autolocalisation basée sur une fusion multisensorielle exploitant un nouveau modèle d'observation. Ce dernier a la particularité d'être robuste aux erreurs de correspondance, lesquelles sont particulièrement fréquentes lorsque des objets imprévus sont présents dans l'environnement et lorsque la plate-forme glisse sur le sol. La fusion multisensorielle est réalisée par un filtre de Kalman étendu.

Proposé par Schmidt (1970), le filtre de Kalman étendu est utilisé pour l'évaluation de paramètres sujets aux bruits de mesure et variant selon des lois non linéaires. L'estimation de la pose d'une plate-forme à partir de ce filtre se réalise en deux étapes. La première, la phase de prédiction, exploite le modèle dynamique du système. La seconde, la phase de correction, utilise un modèle d'observation liant la pose à des mesures sensorielles de l'environnement. En milieux intérieurs, le modèle d'observation se base couramment sur des mesures provenant de capteurs embarqués comme des télémètres laser (Carlson *et al.*, 2008), des infrarouges (Wei *et al.*, 2005) et des sonars (Fabrizi *et al.*, 1998). Ces mesures dépendent étroitement du milieu environnant la plate-forme. En les associant aux données de la carte, elles permettent donc de déduire où la plate-forme se trouve.

L'association des données télémétriques aux données de la carte est réalisée par différentes méthodes de *mise en correspondance*. Une mise en correspondance parfaite signifie que les éléments perçus dans l'environnement correspondent exactement à ceux identifiés dans la carte d'occupation. En pratique, il s'avère souvent impossible de réaliser une mise en correspondance parfaite en raison du bruit de mesures et du fait que des mesures très semblables peuvent être observées à différents endroits de l'environnant. Pour simplifier la mise en correspondance, cette dernière est souvent réalisée à partir d'une estimation initiale de la pose de la plate-forme. Par exemple dans le modèle par faisceaux (*beams model*), on suppose que les points qui seraient perçus par les capteurs dans l'environnement virtuel (selon l'estimation courante de la pose) correspondent aux points détectés dans l'environnement réel (Thrun *et al.*, 2005), (De Laet *et al.*, 2008). Comme cette assumption est d'autant moins réaliste que l'estimation de la pose courante est mauvaise, elle peut cependant rapidement mener à la divergence de l'estimation de la pose de la plate-forme. Les

modèles par faisceaux sont donc particulièrement sensibles aux erreurs d'orientation et aux disparités entre l'environnement réel et virtuel. Pour augmenter la robustesse du modèle par faisceau, plusieurs positions initiales peuvent être considérées afin de retenir celle qui maximise la corrélation des mesures réelles et virtuelles (*correlation-based model*). Cette approche augmente toutefois la lourdeur des traitements. Un moyen de rendre la mise en correspondance plus robuste consiste à l'effectuer seulement sur des éléments pouvant difficilement être confondus, soit sur des formes caractéristiques (*feature-based model*). Les formes utilisées doivent néanmoins être faciles à distinguer et se trouver en quantité suffisante dans l'environnement, ce qui peut s'avérer problématique par exemple le long d'un couloir. Ces modèles d'observation font aussi abstraction du rôle de l'erreur de correspondance, qui est souvent prédominant en raison de l'imprécision des techniques d'association et de la présence de disparités entre l'environnement réel et représenté.

Afin de minimiser l'occurrence d'erreurs de correspondance, les éléments nouveaux peuvent être détectés et ajoutés à l'environnement de navigation. Ce problème, exigeant la localisation et la construction de carte simultanée (*Simultaneous Localization and Map Building*), fut largement étudié dans la littérature. Pour obtenir une estimation réaliste de la pose malgré les performances de la construction de la carte, il demeure néanmoins essentiel d'avoir une localisation à la base robuste aux erreurs de correspondance.

D'autres méthodes d'autolocalisation traitent la mise en correspondance comme un problème d'appariement de points 2D (Zhang, 1994), (Censi *et al.*, 2005), (Horn et Kreutner, 2009). Cet appariement implique deux principaux problèmes : la registration et le recalage géométrique. Parmi les méthodes de recalage géométrique les plus utilisées, on trouve le SVD (*Singular Value Decomposition*) (Arun *et al.*, Sept. 1987), la méthode des quaternions unitaires (Horn, 1987) et de doubles quaternions (Walker *et al.*, 1991). Plusieurs approches résolvent le problème de registration et de recalage de manière simultanée à l'aide de techniques itératives (Zhang, 1994), Ho *et al.* (2007) ou en une étape, tel qu'en utilisant les propriétés de la transformée de Hough (Censi *et al.*, 2005). La registration peut également être réalisée entre les points issus des mesures réelles et de droites de l'environnement virtuel (Horn et Kreutner, 2009)¹. Ces méthodes font toutefois abstraction du rôle de l'erreur d'association, ce qui rend difficile l'évaluation de la précision du recalage nécessaire à la pondération du modèle d'observation du filtre de Kalman. La localisation devient ainsi sensible aux éléments imprévus de l'environnement.

Pour obtenir une méthode d'autolocalisation robuste en environnements partiellement inconnus et en présence de glissements au sol, nous proposons premièrement une méthode rapide d'appariement de points 2D de complexité $O(n \cdot m)$ ($O(n)$ pour le recalage géométrique), laquelle tient compte des erreurs d'association et permet l'évaluation de la précision du recalage. Cette méthode

¹Cette dernière approche nécessite toutefois une analyse vidéo pour une estimation robuste de l'orientation de la plate-forme.

permet ensuite d'introduire un modèle d'observation linéaire qui réduit l'impact des erreurs de correspondance. Le modèle d'observation est enfin utilisé dans un filtre de Kalman étendu.

Le chapitre est subdivisé en cinq sections. La section 2 décrit la formulation du problème. La section 3 présente la méthode d'appariement de points 2D, laquelle est ensuite exploitée à la section 4 dans le modèle d'observation du filtre de Kalman. Des résultats expérimentaux sont finalement présentés à la section 5.

8.2 Énoncé du problème

L'objectif est d'obtenir une méthode d'autolocalisation d'une plate-forme mobile opérant sous les conditions suivantes.

L'évaluation de la pose de la plate-forme se base sur une fusion multisensorielle comprenant des mesures de vitesse de déplacement et des données de capteurs de proximité, tels que des télémètres lasers, des sonars et des infrarouges. Cette fusion, réalisée par filtrage de Kalman, comprend l'interaction d'un modèle dynamique et d'un modèle d'observation, tels qu'illustrés à la figure 8.1. Le modèle dynamique prédit une pose en fonction des mesures de vitesse et de la pose précédente, à partir d'une pose initiale connue. Le modèle d'observation corrige cette pose prédite en réalisant un appariement de points 2D, lesquels sont extraits des mesures sensorielles et des points d'occupation de la carte².

L'environnement est connu et représenté en mémoire par une cartographie 2D statique. Il comporte toutefois des éléments inattendus non introduits à la carte ni ajoutés aux connaissances à priori (aucune construction de carte n'est réalisée). Ces objets introduisent des erreurs lors de la mise en correspondance de l'information sensorielle et cartographiée. De plus, la plate-forme est sujette à glisser au sol, ce qui cause une erreur sur les vitesses de déplacement mesurées et peut affecter l'estimation de la pose de manière conséquente. Les erreurs de correspondance, dues aux

²Les points sont tous fournis par la plate-forme virtuelle comme il est présenté au chapitre 5

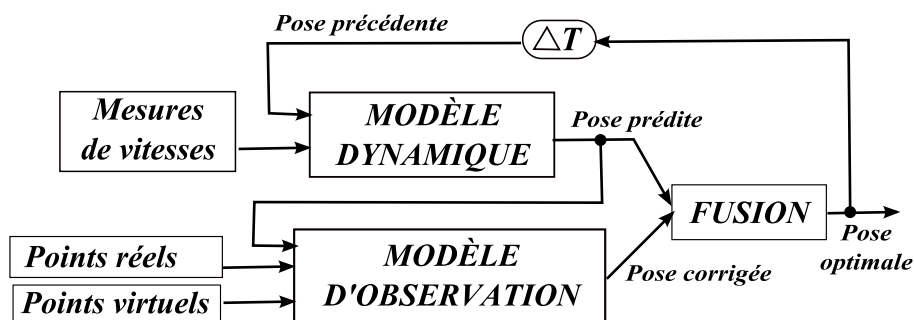


Figure 8.1 Localisation par fusion multisensorielle.

objets imprévus et aux glissements, doivent avoir un impact minimal sur l'estimation de la pose de la plate-forme.

8.3 Technique d'appariement de points 2D

Cette section décrit la technique d'appariement de points 2D qui sera à la base du modèle d'observation utilisé dans le filtrage de Kalman de la section suivante. Elle comprend le problème de registration et de recalage géométrique.

8.3.1 Registration

La registration de points 2D établit la correspondance entre l'information mesurée et représentée. L'information mesurée est liée aux points d'occupation réels $\tilde{P} = \{\tilde{p}_i, i = 1, \dots, N\}$, lesquels sont exprimés dans le repère de la carte en connaissance de la pose prédite de la plate-forme. La technique *des plus proches voisins* est utilisée : chaque point réel \tilde{p}_i est couplé avec le point de l'environnement virtuel \tilde{q}_i de distance minimale.

8.3.2 Recalage géométrique de points 2D

Définition du problème

Le recalage géométrique de points 2D consiste à trouver les matrices de transformation homogène liant deux ensembles de points.

L'ensemble $P = \{p_i, i = 1, \dots, N\}$, dit *réel*, comprend les positions des points réellement perçus dans l'environnement, lesquelles sont relative à la pose estimée de la plate-forme. L'ensemble $Q = \{q_i, i = 1, \dots, N\}$, dit *virtuel*, comprend les mêmes points physiques que ceux de l'ensemble P , mais sur la grille d'occupation. Comme l'erreur sur l'estimée de la pose rend l'ensemble P décalé de l'ensemble, Q . chaque point q_i peut être obtenu en appliquant une transformation (T, R) sur le point correspondant p_i , où T est un vecteur de translation et R une matrice de rotation :

$$q_i = T + R p_i \quad \forall i \in \{1, \dots, N\} \quad (8.1)$$

Dans les contextes réels, les mesures sensorielles sont bruitées, ce qui produit l'ensemble de points $\tilde{P} = \{\tilde{p}_i, i = 1, \dots, N\}$, ne correspondant pas exactement aux points physiques détectés dans l'environnement. Par ailleurs, la correspondance entre les points extraits des mesures et ceux de la grille est inconnue, ce qui introduit des erreurs d'association produisant l'ensemble $\tilde{Q} = \{\tilde{q}_i, i = 1, \dots, N\}$ ne représentant pas les mêmes points physiques que \tilde{P} . Si δ_i^M est le bruit de

mesure sur p_i et δ_i^C est l'erreur de pairage affectant $\{p_i, q_i\}$, on peut écrire :

$$\tilde{p}_i = p_i + \delta_i^M \quad \forall i \in \{1, \dots, N\} \quad (8.2)$$

$$\tilde{q}_i = q_i + \delta_i^C \quad \forall i \in \{1, \dots, N\} \quad (8.3)$$

En insérant ces équations dans (8.1), l'expression de l'erreur de pairage δ_i^C est obtenue :

$$\delta_i^C = -T - R(\tilde{p}_i - \delta_i^M) + \tilde{q}_i \quad \forall i \in \{1, \dots, N\} \quad (8.4)$$

La figure 8.2 schématise les relations entre les points réels de P , leurs estimations bruitées de \tilde{P} , les points virtuels de Q et leurs estimations de \tilde{Q} .

Calcul des matrices de transformation homogène

Le calcul des matrices de transformation homogène se fonde sur les hypothèses suivantes :

1. Le bruit de mesure et l'erreur de pairage sont considérés comme étant des processus gaussiens centrés zéro, de variance σ_M^2 et σ_C^2 respectivement :

$$\delta_i^M \longrightarrow N(0, \sigma_M^2)$$

$$\delta_i^C \longrightarrow N(0, \sigma_C^2)$$

2. Il n'existe pas de matrice $\{R, T\}$ qui minimise davantage l'erreur quadratique moyenne que $\{R^*, T^*\}$;
3. L'espérance mathématique d'une variable aléatoire tend vers sa moyenne :

$$\overline{\chi_i} = E[\chi_i] = \frac{1}{N} \sum_i^N \chi_i.$$

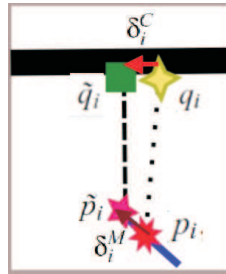


Figure 8.2 Relation entre points réels, virtuels et leurs estimations.

Étape 1 : exprimer T^* en fonction de R^* En insérant les expressions (8.2) et (8.3) dans (8.1), le vecteur de translation \tilde{t}_i est donné par :

$$\tilde{t}_i = T^* + \delta_i^C - R^* \delta_i^M \quad (8.5)$$

$$= \tilde{q}_i - R^* \tilde{p}_i \quad (8.6)$$

et son espérance mathématique par :

$$\begin{aligned} E[\tilde{t}_i] &= T^* \\ &= \overline{\tilde{q}_i} - R^* \overline{\tilde{p}_i} \end{aligned} \quad (8.7)$$

Étape 2 : déduction de R^* Partant de (8.5), l'expression de l'erreur de pairage δ_i^C est calculée comme une fonction de T^* et de R^* :

$$\delta_i^C = \tilde{t}_i - T^* + R^* \delta_i^M \quad (8.8)$$

Comme R^* et T^* minimisent l'erreur quadratique moyenne :

$$J^* = \min E \left[(\delta_i^C)^T \delta_i^C \right] \quad (8.9)$$

En insérant l'équation (8.8) dans (8.9), en remplaçant $E[(\delta_i^M)^T \delta_i^M]$ par σ_M^2 et en notant que $E[(\delta_i^C)^T R^* \delta_i^M] = \sigma_M^2$, puisque δ_i^C et δ_i^M sont corrélés via (8.8), l'expression suivante est obtenue :

$$J^* = E \left[(\tilde{t}_i - T^*)^T (\tilde{t}_i - T^*) \right] - \sigma_M^2 \quad (8.10)$$

Ce résultat montre que la variance du vecteur de translation \tilde{t}_i , que l'on note ΔT^2 , correspond à la variance minimale de l'erreur de pairage additionnée au bruit de mesure :

$$\begin{aligned} \Delta T^2 &= E \left[(\tilde{t}_i - T^*)^T (\tilde{t}_i - T^*) \right] \\ &= E \left[(\delta_i^C)^T \delta_i^C \right] + \sigma_M^2. \end{aligned} \quad (8.11)$$

En insérant les expressions (8.5) et (8.7) dans (8.11), puis en utilisant l'angle ϕ^* associé à la matrice de rotation R^* , l'expression de la fonction de coût peut être réécrite comme suit :

$$\begin{aligned} J^* &= \overline{\tilde{q}_i^T \tilde{q}_i} + \overline{\tilde{p}_i^T \tilde{p}_i} - \overline{\tilde{q}_i^T \tilde{q}_i} - \overline{\tilde{p}_i^T \tilde{p}_i} - \sigma_M^2 \\ &\quad - 2 \cos(\phi^*) \left(\overline{\tilde{p}_{ix} \tilde{q}_{ix}} + \overline{\tilde{p}_{iy} \tilde{q}_{iy}} - \overline{\tilde{p}_{ix} \tilde{q}_{iy}} - \overline{\tilde{p}_{iy} \tilde{q}_{ix}} \right) \\ &\quad - 2 \sin(\phi^*) \left(\overline{\tilde{p}_{iy} \tilde{q}_{ix}} - \overline{\tilde{p}_{ix} \tilde{q}_{iy}} - \overline{\tilde{p}_{ix} \tilde{q}_{iy}} + \overline{\tilde{p}_{iy} \tilde{q}_{ix}} \right) \end{aligned} \quad (8.12)$$

où $\tilde{p}_i = [\tilde{p}_{ix} \quad \tilde{p}_{iy}]^T$ et $\tilde{q}_i = [\tilde{q}_{ix} \quad \tilde{q}_{iy}]^T$.

En posant la dérivée égale à zéro, nous obtenons :

$$\phi^* = \text{atan2} \left(\overline{\tilde{p}_{ix}\tilde{q}_{iy}} - \overline{\tilde{p}_{iy}\tilde{q}_{ix}} - \overline{\tilde{p}_{ix}\tilde{q}_{iy}} + \overline{\tilde{p}_{iy}\tilde{q}_{ix}}, \right. \\ \left. \overline{\tilde{p}_{ix}\tilde{q}_{ix}} + \overline{\tilde{p}_{iy}\tilde{q}_{iy}} - \overline{\tilde{p}_{ix}\tilde{q}_{ix}} - \overline{\tilde{p}_{iy}\tilde{q}_{iy}} \right). \quad (8.13)$$

La matrice de rotation optimale R^* est déduite directement de cette expression :

$$R^* = \begin{bmatrix} \cos(\phi^*) & -\sin(\phi^*) \\ \sin(\phi^*) & \cos(\phi^*) \end{bmatrix}$$

Connaissant R^* , on peut calculer T^* via l'équation (8.7).

Algorithme

1. Évaluer les moyennes :

$$\begin{matrix} \overline{\tilde{p}_{ix}\tilde{q}_{iy}}, & \overline{\tilde{p}_{iy}\tilde{q}_{ix}}, & \overline{\tilde{p}_{ix}\tilde{q}_{ix}}, & \overline{\tilde{p}_{iy}\tilde{q}_{iy}}, \\ \overline{\tilde{p}_{ix}}, & \overline{\tilde{p}_{iy}}, & \overline{\tilde{q}_{ix}}, & \overline{\tilde{q}_{iy}} \end{matrix}$$

2. Évaluer l'angle ϕ^* via l'équation (8.13) ;
3. Évaluer la matrice de rotation $R^*(\phi^*)$;
4. Évaluer le vecteur de translation $T^*(8.7)$.

Complexité de l'algorithme de recalage géométrique

La première étape de l'algorithme implique des calculs de moyennes de complexité $O(n)$. Les étapes 2,3 et 4 ne dépendent pas de la taille des données. Ainsi, la complexité générale du recalage géométrique est $O(n)$.

Incertitude des matrices de transformation homogène

Cette sous-section vise l'obtention de l'incertitude ΔT^* du vecteur de translation T^* ainsi que l'incertitude $\Delta\phi^*$ de l'écart angulaire ϕ^* . Ces valeurs, qui fournissent une mesure pratique de la corrélation entre deux ensembles de points, seront indispensables dans le modèle d'observation du filtre de Kalman.

Matrice de covariance du vecteur de translation La covariance du vecteur de translation, Ω_T^2 , est :

$$\begin{aligned}\Omega_T^2 &= E \left[(\tilde{t}_i - T^*) (\tilde{t}_i - T^*)^T \right] \\ &= \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_x \sigma_y \\ \sigma_y \sigma_x & \sigma_y^2 \end{bmatrix},\end{aligned}\quad (8.14)$$

et correspond à la covariance réorientée du bruit de mesure additionnée à celle de l'erreur de pairage :

$$\Omega_T^2 = E \left[\delta_i^C (\delta_i^C)^T \right] + R^* E \left[\delta_i^M (\delta_i^M)^T \right] (R^*)^T. \quad (8.15)$$

Incertitude sur l'orientation Comme l'orientation optimale ϕ^* minimise l'incertitude de la translation ΔT , cette orientation est d'autant plus plausible que l'amplitude de ΔT est faible. Considérant que la valeur maximale de l'erreur angulaire est $\pm\pi$, nous avons :

$$\lim_{\Delta T \rightarrow 0} \Delta\phi^* = 0 \quad (8.16)$$

$$\lim_{\Delta T \rightarrow \infty} \Delta\phi^* = \pi \quad (8.17)$$

La formule empirique suivante fournit une estimation pratique de l'incertitude sur l'écart d'orientation :

$$\Delta\phi^* = \frac{\pi \Delta T}{\Delta T + \Delta T_{high}} \quad (8.18)$$

où ΔT_{high} est une erreur de translation impliquant nécessairement des erreurs de pairage appréciables.

Robustesse

Au cours des développements précédents, il était présumé que les erreurs de mesures et de pairage varient sous des lois normales de moyennes nulles.

En réalité, la présence d'éléments inconnus dans l'environnement engendrera des erreurs de correspondance de moyenne possiblement non nulle. Néanmoins, si la proportion des points erronés (issus d'objets inattendus) reste minoritaire, l'équation (8.4) fournira une bonne approximation de l'erreur de correspondance associée à chaque paire. Ayant réalisé une première estimation de T^* et R^* via (8.13) et (8.7), nous obtenons en négligeant le bruit de mesure :

$$\tilde{\delta}_i^C = -T^* - R^* \tilde{p}_i + \tilde{q}_i \quad \forall i \in \{1 \dots, N\}$$

Or, plus l'erreur de correspondance $\tilde{\delta}_i^C$ de la paire i est importante, moins cette dernière doit

influencer les valeurs de R^* et T^* . Partant de ce principe, chaque paire est pondérée par un poids γ_i tel que :

$$\gamma_i(\sigma_i^c) = \exp\{-\beta(\sigma_i^c)^2\}, \quad (8.19)$$

où $(\sigma_i^c)^2 = \tilde{\delta}_i^c * \tilde{\delta}_i^c$ est le coefficient d'incertitude. Le paramètre β , défini positif, peut être ajusté de manière empirique et détermine le taux de rejet des mauvaises paires. Cette expression permet une distribution flexible de leur pondération relative. Les valeurs de R^* et T^* peuvent ensuite être mise à jour en utilisant les moyennes pondérées suivantes dans les étapes 1 et 2 de l'algorithme (8.3.2) :

$$\frac{\tilde{p}_{ix}\tilde{q}_{iy}\gamma_i}{\tilde{p}_{ix}\gamma_i}, \quad \frac{\tilde{p}_{iy}\tilde{q}_{ix}\gamma_i}{\tilde{p}_{iy}\gamma_i}, \quad \frac{\tilde{p}_{ix}\tilde{q}_{ix}\gamma_i}{\tilde{q}_{ix}\gamma_i}, \quad \frac{\tilde{p}_{iy}\tilde{q}_{iy}\gamma_i}{\tilde{q}_{iy}\gamma_i}.$$

8.3.3 Sommaire de l'algorithme

1. L'ensemble \tilde{Q} est obtenu sous le principe des plus proches voisins de P :

$$\tilde{q}_i = \arg \min_{1 \leq j \leq M} \text{dist}(\tilde{p}_i, c_{ij})$$

où les points d'occupation entourant \tilde{p}_i sont $\{c_{ij}, j = 1, \dots, M\}$ et dist représente la distance euclidienne ;

2. Trouver R^* et T^* par la méthode de recalage (8.3.2) ;
3. Pondérer chaque paire via (8.19), recalculer R^* et T^* avec les moyennes pondérées (voir section 8.3.2).

Complexité de l'algorithme Nous avons démontré à la sous-section (8.3.2) que le recalage géométrique est de complexité $O(n)$. Comme chaque point additionnel implique M comparaisons supplémentaires, la complexité de l'étape 1 est directement proportionnelle au nombre de points, ce qui cause une complexité $O(n \cdot m)$. L'étape 3 nécessite un calcul de moyenne pour chaque point, causant une complexité $O(n)$. La complexité totale est donc $O(n \cdot m)$.

8.4 Localisation par filtre de Kalman étendu

Cette section décrit le filtre de Kalman effectuant la localisation de la plate-forme à partir des mesures de vitesses et de proximité.

8.4.1 Description du filtre de Kalman

Le filtre de Kalman estime l'état (la pose de la plate-forme) le plus plausible en se basant sur : un modèle dynamique décrivant l'évolution temporelle du système ; et un modèle d'observation

liant cet état à des mesures sensorielles. Le modèle dynamique est caractérisé par une fonction de transfert f qui prédit l'état courant χ_k en fonction de l'état précédent χ_{k-1} et des mesures de vitesses V_k . Cette estimation de l'évolution du système n'est toutefois pas exacte, elle comporte une erreur inconnue notée $-\psi_k$. La relation exacte entre la configuration actuelle et future est ainsi :

$$\chi_k = f(\chi_{k-1}, V_k) + \psi_k \quad (8.20)$$

Le modèle d'observation permet d'améliorer l'estimation de l'état prédit en se référant à des mesures sensorielles Z_k , lesquelles subissent un bruit ξ_k . La relation entre l'état et les mesures sensorielles est décrite par la matrice de mesure notée $h(\chi_k)$. Le modèle d'observation suivant décrit la relation entre les mesures et l'état :

$$Z_k = h(\chi_k) + \xi_k. \quad (8.21)$$

Il a été démontré que l'estimé de Kalman est optimal³ si les bruits de mesure et d'état respectent les conditions suivantes⁴ :

1. ψ_k ne dépend pas de l'état ;
2. ψ_k et ξ_k ne sont pas corrélés ;
3. ψ_k et ξ_k sont des gaussiennes de moyenne nulle.

Définissons la matrice de covariance du bruit d'état :

$$Q_k = E[\psi_k \psi_k^T], \quad (8.22)$$

la matrice de covariance du bruit de mesure :

$$R_k = E[\xi_k \xi_k^T], \quad (8.23)$$

et les matrices de transition et d'observation représentées par les jacobienness ci-dessous :

$$F_k = \left. \frac{\delta f}{\delta x} \right|_{\hat{\chi}_{k-1|k-1}, V_k} \quad (8.24)$$

$$H_k = \left. \frac{\delta h}{\delta x} \right|_{\hat{\chi}_{k|k-1}} \quad (8.25)$$

$$(8.26)$$

³Le résultat est optimal au sens qu'il minimise l'erreur quadratique moyenne.

⁴Rappelons que la présence de glissements au sol peut induire un bruit d'état ψ_k de moyenne non nulle et la présence d'objets imprévus un bruit de mesure ξ_k également de moyenne non nulle : causant une estimation sous-optimale.

En chaque temps, le filtre de Kalman réalise une *prédiction* suivie d'une *mise à jour*. La prédiction concerne celle de la pose optimale $\hat{\chi}_{k|k-1}$ et de la matrice de covariance de l'erreur $P_{k|k-1}$:

$$\hat{\chi}_{k|k-1} = f(\hat{\chi}_{k-1|k-1}, V_k) \quad (8.27)$$

$$P_{k|k-1} = F_k P_{k-1|k-1} F_k^T + Q_k, \quad (8.28)$$

et la mise à jour comprend celle de l'innovation \hat{y} , de la covariance sur l'innovation S_k , du gain de Kalman K_k , de la pose optimale $\hat{\chi}_{k|k}$ et de la matrice de covariance de l'erreur $P_{k|k}$:

$$\hat{y}_k = Z_k - h(\chi_{k|k-1}) \quad (8.29)$$

$$S_k = H_k P_{k|k-1} H_k^T + R_k \quad (8.30)$$

$$K_k = P_{k|k-1} H_k^T S_k^{-1} \quad (8.31)$$

$$\hat{\chi}_{k|k} = \hat{\chi}_{k|k-1} + K_k \hat{y}_k \quad (8.32)$$

$$P_{k|k} = (I - K_k H_k) P_{k|k-1}. \quad (8.33)$$

8.4.2 Modèle dynamique

Le modèle dynamique est obtenu par une simple intégration des vitesses mesurées (*Dead-reckoning*). Supposons une pose $\chi_k = [x_k, y_k, \theta_k]'$, une vitesse longitudinale v_k et une vitesse angulaire ω_k . L'intervalle de temps entre chaque étape consécutive est ΔT . Les équations dynamiques seront par conséquent :

$$\theta_{k+1} = \theta_k + \Delta T \cdot \omega_k,$$

$$x_{k+1} = x_k + v_k \Delta T \cdot \cos \theta_k,$$

$$y_{k+1} = y_k + v_k \Delta T \cdot \sin \theta_k.$$

Notez que le modèle dynamique utilisé peut varier selon la plate-forme.

8.4.3 Modèle d'observation basé sur l'association de points 2D

La matrice de mesure du modèle d'observation est la suivante :

$$h(\chi_{k|k-1}) = \begin{bmatrix} x_{k|k-1} + T_x^* \\ y_{k|k-1} + T_y^* \\ \theta_{k|k-1} + \phi^* \end{bmatrix} \quad (8.34)$$

où $\{T_x^*, T_y^*, \phi^*\}$ sont obtenus à l'étape k à l'aide de la technique de la section 8.3. La matrice de covariance du bruit de mesure est obtenue à partir des équations (8.14) et (8.18) :

$$\Xi = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 + \varepsilon & \sigma_x \sigma_y & 0 \\ \sigma_y \sigma_x & \sigma_y^2 + \varepsilon & 0 \\ 0 & 0 & \Delta\phi^{*2} + \varepsilon \end{bmatrix}, \quad (8.35)$$

où la valeur ε assure la stabilité du filtre lorsque l'incertitude liée à la translation et la rotation est très faible.

Lorsque de larges ou plusieurs obstacles sont présents dans l'environnement, produisant une augmentation considérable des erreurs de correspondances entre \tilde{P} et \tilde{Q} , les valeurs des éléments de la diagonale de la matrice de covariance du bruit de mesure Ξ augmenteront en conséquence (voir l'expression 8.15). Ceci réduira la confiance envers le modèle d'observation pour donner plus de poids au modèle dynamique, limitant ainsi l'impact des éléments inconnus.

8.5 Résultats expérimentaux

Ces expérimentations ont été réalisées à l'aide d'un Mini ATRV équipé d'un télémètre laser. Elles présentent la localisation de la plate-forme en environnement contrôlé, à la figure 8.3, puis comportant des éléments inconnus, à la figure 8.4. À titre comparatif, la plate-forme est également localisée à l'aide d'un système de localisation externe décrit à l'annexe B.

Ajustement des paramètres de navigation

- Les bruits de mesure sur la vitesse linéaire et angulaire sont estimés respectivement à $0.06m/s$ et $0.06rad/s$, lesquels sont légèrement surestimés en vue de réduire l'impact des glissements au sol souvent rencontrés avec le Mini.
- Le taux de rejet des mauvaises paires β utilisé dans l'équation (8.19) est ajusté à 0.3.
- La valeur numérique de ε dans l'équation (8.35) est à 0.0001.

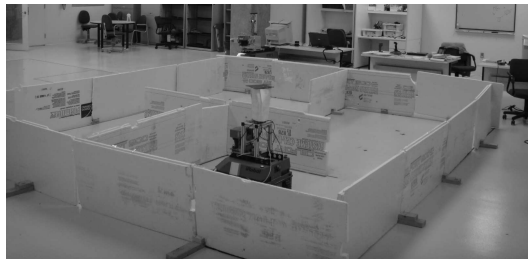


Figure 8.3 Environnement contrôlé de navigation.



Figure 8.4 Environnement de navigation comportant des objets inattendus.

8.5.1 Recalage géométrique, simulations

L'objectif de ces simulations, réalisées à l'aide de Matlab, est de vérifier la précision et la complexité du recalage géométrique.

La quantité N de points formant les ensembles P et Q passe de 2^2 à 2^{15} . À chaque essai, l'ensemble P est généré de manière aléatoire, ainsi que l'erreur de translation T et l'erreur sur la rotation ϕ . L'ensemble Q est ensuite obtenu en appliquant les matrices de transformation à l'ensemble P .

La figure 8.5 trace le temps d'exécution en fonction de la taille N des ensembles. L'erreur sur T^* et ϕ^* s'apparente à un bruit numérique, de l'ordre de 5^{-15} pour la translation et $3e^{-16}$ pour l'orientation. La figure démontre une relation linéaire entre le temps d'exécution et la taille des ensembles, ce qui démontre une complexité $O(n)$.

8.5.2 Tests expérimentaux

L'erreur moyenne est estimée par l'écart entre la trajectoire évaluée par notre système avec celle du système de localisation externe. Cette erreur, obtenue à partir de plusieurs essais de suivi d'une trajectoire, se situait à $0.12m$ avec un écart type de $0.10m$. Toutefois, comme la précision du système externe est de l'ordre de 15 cm , ces résultats permettent seulement de conclure que notre approche comportait une précision minimale de 15 cm .

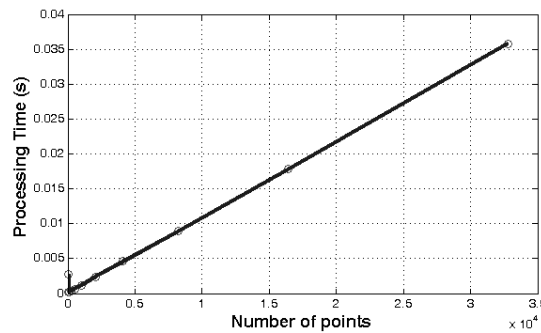


Figure 8.5 Temps d'exécution en fonction de la taille N des ensembles de points.

Un résultat typique est illustré à la figure 8.6. Le trait continu représente la trajectoire évaluée par l'appareil de localisation externe, le trait en pointsillés la trajectoire de notre approche et le trait discontinu la trajectoire obtenue en intégrant les vitesses mesurées.

La figure 8.7 présente un exemple de glissement important au sol au cours du premier quart de la trajectoire. Le glissement cause une déviation progressive de la trajectoire obtenue en intégrant les vitesses mesurées. La distance entre la trajectoire de notre approche et celle du système de localisation externe demeure inférieure à 15 cm, d'où une précision minimale de 15 cm (limite du système de localisation externe).

Pour le dernier scénario, plusieurs obstacles inconnus (au sens qu'ils ne sont pas présents dans la carte de référence) sont ajoutés à l'environnement. La même trajectoire fut exécutée à plusieurs reprises. Tant que la proportion des points erronés (provenant des objets inconnus) restait minime, la pose évaluée par notre système restait réaliste. La figure 8.8 présente un exemple de succès⁵. Dans de telles circonstances, la matrice de covariance du bruit de mesure (équation 8.35) augmente en conséquence de l'accroissement des erreurs de correspondance, ce qui a pour effet d'augmenter le poids du modèle dynamique, donc de limiter les perturbations causées par les obstacles inattendus.

La figure 8.9 montre un exemple d'échec. Un échec survient typiquement avec une proportion prépondérante de points erronés stagnants⁶ sur une longue période de temps (plusieurs secondes).

8.6 Conclusion

Il a été présenté dans ce chapitre une méthode d'association de points 2D de complexité $O(n \cdot m)$ robuste aux erreurs de pairing. Cette méthode peut avantageusement être utilisée afin de corriger l'estimation de la pose d'une plate-forme. Son utilisation dans le modèle d'observation d'un filtre de Kalman offre une localisation robuste aux glissements et aux objets inconnus présents dans l'environnement. Le modèle d'observation développé pourrait aussi servir en conjonction avec d'autres approches de localisation, telles que celles basées sur des filtres à particules.

La méthode de localisation développée devrait s'avérer utile dans l'application de fauteuil roulant motorisé semi-autonome (FMRSA). Les FRMSA naviguent, en effet, couramment en lieux comportant des objets mobiles et des personnes.

⁵Un *succès* correspond au cas où la pose de la plate-forme serait toujours suivie avec une précision acceptable ; tandis qu'un *échec* implique une divergence vers des estimations possiblement de plus en plus éloignées de la pose réelle.

⁶Des points erronés *stagnants* engendrent une erreur de translation/rotation répétitive de l'estimation de la pose, pouvant éventuellement mener à la divergence. À l'opposée, des points erronés *fluctuants* impliquent des erreurs de positionnement contradictoires d'un instant à l'autre, diminuant ainsi leurs impacts.

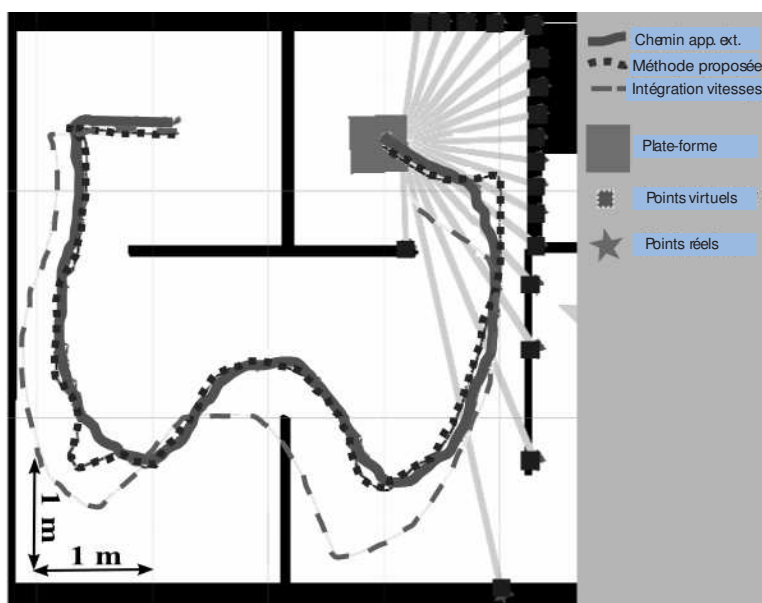


Figure 8.6 Trajectoires estimées de la plate-forme dans l'environnement de navigation.

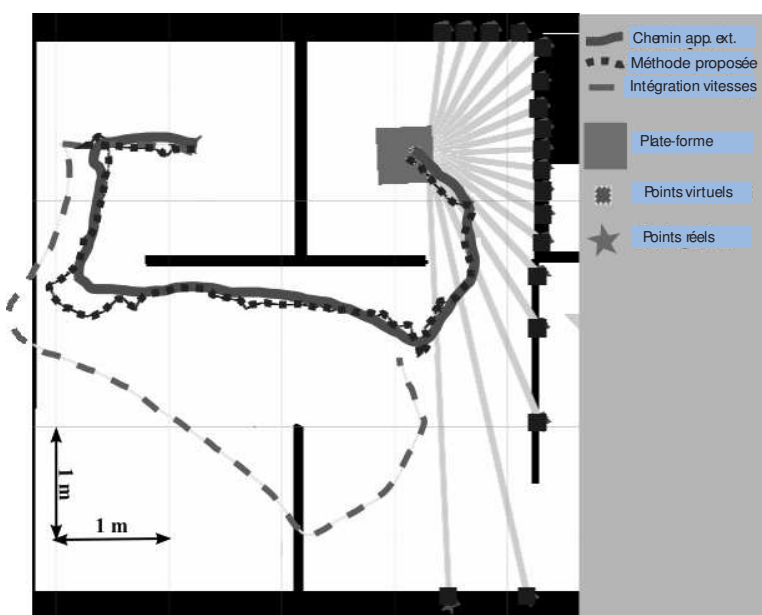


Figure 8.7 Estimation de la pose de la plate-forme lorsqu'elle subit d'importants glissements au sol.

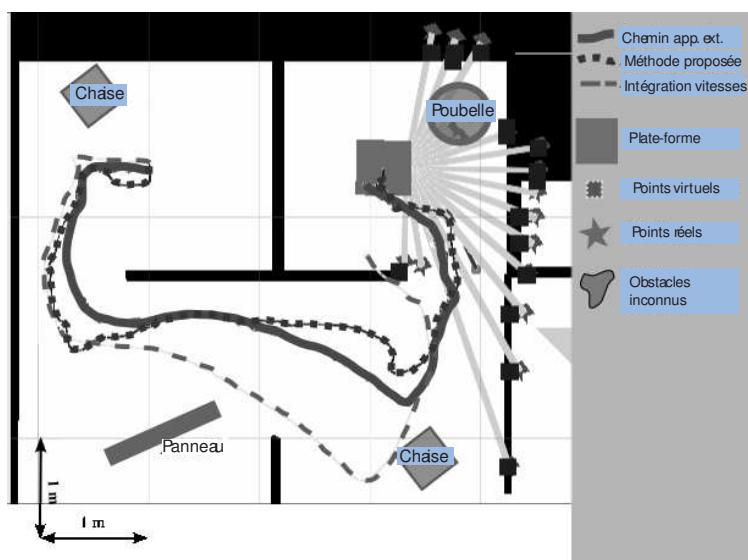


Figure 8.8 Suivi de pose en présence de glissements et d'objets inconnus.

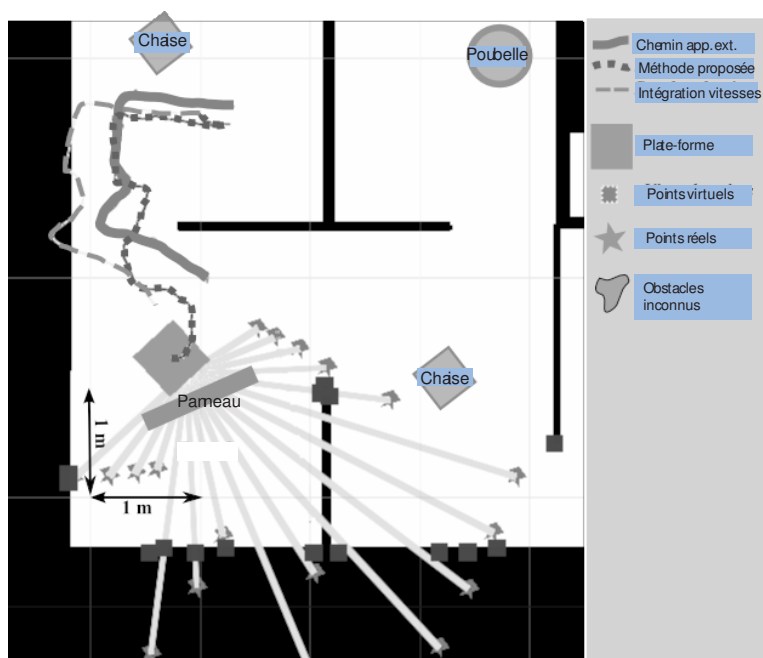


Figure 8.9 Exemple d'échec de suivi de pose.

CHAPITRE 9

SYSTÈME DE NAVIGATION SEMI-AUTONOME PROPOSÉ

Ce chapitre résume le système de navigation semi-autonome proposé en réponse aux objectifs décrits à l'introduction. Le rapport personne-machine est discuté à la section 9.1, suivi de l'architecture de contrôle à la section 9.2 et d'une présentation du prototype à la section 9.3.

9.1 Rapport personne-machine

Comme il a été mentionné dans la revue de littérature, un système de navigation facile d'appropriation implique qu'il soit simple à comprendre, que ses comportements soient prévisibles et cohérents aux attentes des usagers.

Pour notre solution, la simplicité d'appropriation repose sur des commandes : (1) en nombre minimal, (2) qui s'accommodent à un maximum de contextes généraux, (3) qui correspondent (par leur nom) et qui activent des *stratégies adaptatives* du système de navigation. Ceci exige aussi (4) une conscientisation de l'utilisateur des limites et des propriétés du système.

Ayant un nombre minimal de manoeuvres, l'utilisateur a une meilleure vue d'ensemble des possibilités du système. Il peut donc plus aisément choisir la manoeuvre la plus appropriée à ses fins et se familiariser rapidement à ses comportements. Pour ne pas limiter la portée du système, ceci suppose toutefois que chaque manoeuvre reste générale et puisse s'adapter à un maximum de contextes.

Rappelons qu'une *stratégie* de navigation définit le comportement du système en réponse aux objectifs de la tâche et aux contraintes cinématiques, spatiales, etc. Une *stratégie adaptative* implique un comportement s'adaptant aux contraintes instantanées, comprenant l'environnement local. L'activation d'une stratégie adaptative et la compréhension des limites du système sont essentiels pour que l'utilisateur comprenne *ce que le système essaye de réaliser et dans quelles mesures il en est capable*. En comprenant bien ce que le système de navigation tente de réaliser en réponse à une commande, l'utilisateur peut plus aisément identifier l'ensemble des contextes où la stratégie s'applique. La possibilité de sélectionner la stratégie met à contribution sa capacité d'adaptation et lui donne ainsi l'opportunité de contribuer au succès de la tâche. Pour illustrer ce propos, considérons une commande nommée *monte la pente*. Dans cet exemple, cette commande ne correspond pas à une stratégie adaptative¹, car elle active indépendamment de la pente : une stratégie *d'avancer tout droit* à partir des vitesses de déplacement ou de *suivre les obstacles latéraux*, soit la rampe. Ces

¹Elle pourrait correspondre à une stratégie adaptative dans le cas où le système de navigation adapterait son comportement à la pente observée.

deux stratégies provoqueront toutes deux des comportements et des performances bien distinctes qui dépendront de la pente en question. Si la première stratégie est utilisée par défaut et qu'un glissement survient, le fauteuil évoluera en biais et l'utilisateur, ayant simplement commandé de monter la pente, pourrait ne pas comprendre cette évolution diagonale. Si la deuxième stratégie est employée et que la configuration de la rampe rend très difficile l'alignement, l'utilisateur pourrait également ne pas comprendre que le fauteuil oscille à cause de la configuration de la rampe à ses côtés. Dans les deux cas, l'utilisateur n'est pas en mesure de comprendre le comportement du système de navigation et de contribuer au succès de la tâche. En commandant explicitement les stratégies adaptatives et en étant conscientisé de leurs effets respectifs, l'utilisateur met à contribution son jugement, sa capacité d'adaptation et est aussi en mesure de mieux comprendre le comportement de navigation résultant. Le système devient alors plus prévisible.

La prévisibilité est, en effet, favorisée par un rapport de cause à effet assez direct entre la commande et le comportement de navigation conséquent. Plus le comportement résultant de la commande est constant, plus il est facile à prévoir, donc choisi avec délibération et cohérent aux attentes. Pour ces raisons, la commande implicite est réduite au minimum. Elle se limite au *déblo-cage stratégique* (au premier niveau d'autonomie) lorsque la direction de l'utilisateur est bloquée par les obstacles.

La prévisibilité et la cohérence du système sont aussi influencées par les propriétés des mouvements et des réactions aux obstacles. Plus le système navigue et réagit aux obstacles de manière analogue à celle d'utilisateurs habiles, plus il est susceptible d'être conforme à la navigation désirée des utilisateurs ayant besoin d'assistance. Dans notre cas, cette similitude est satisfaite par la conjonction de nos approches de génération de mouvement et de réaction aux obstacles, comme il sera démontré dans les résultats expérimentaux.

Le respect des attentes des utilisateurs implique que les fonctionnalités disponibles soient suffisantes à la réalisation des déplacements quotidiens. Au premier niveau d'autonomie, l'utilisateur exécute lui-même les manœuvres avec l'assistance stratégique pour la sécurité des mouvements et le déblocage. Au deuxième niveau d'autonomie, les 6 manœuvres évoluées suivantes sont fournies :

1. Avancer en ligne droite dans une direction donnée (mouvement rectiligne) ;
2. Pivoter selon un angle précis ;
3. Suivre un mur à droite ou à gauche ;
4. Se stationner près d'un objet dans une direction donnée ;
5. Traverser un passage étroit ;
6. Suivre une personne, un animal ou un objet mobile.

Parmi ces manœuvres, les quatre premières impliquent une direction. La manière de commander la manœuvre et sa direction varie selon l'interface de commande utilisée. Trois interfaces de

commande ont été adaptées jusqu'ici, basées sur un clavier, une manette de jeu et une interface vocale (Atrash *et al.*, 2009). Le premier niveau d'autonomie est accessible seulement via la manette de jeu. Les critères d'appropriation énumérés plus haut s'appliquent surtout à l'interface clavier et à la manette de jeu. La commande vocale est davantage conçue dans la perspective que l'environnement est connu et de dimension limitée, d'où la possibilité pour le système d'identifier le contexte précis lié à la commande et de choisir lui-même une stratégie adaptée à ce contexte (des commandes hauts niveaux comme «monte la pente» peuvent alors être utilisées).

9.2 Architecture de contrôle du SNSA

Cette section présente l'architecture de contrôle du SNSA, laquelle se base sur les principes d'architecture décrit au chapitre 5. L'architecture de contrôle fut entièrement implémentée dans une plate-forme de développement robotique nommée *Acropolis* (Zalzal *et al.*, 2009). Cette plate-forme permet d'implémenter facilement des processus en des *modules*, de gérer efficacement : d'une part, les liens interprocessus via des *interfaces* et, d'autre part, l'accès aux unités de la réalité virtuelle et aux pilotes matériels, implémentés en des *singletons*. Chaque module possède des entrées, des sorties et contient une fonction *processus* dans laquelle le travail d'une étape est exécuté. Cette fonction peut être appelée en boucle ou seulement lorsqu'une de ses entrées dite *sensible* change d'état. Ceci permet, par exemple, de synchroniser les modules à l'aide d'une horloge.

Les mouvements automatiques sont générés à partir des lois de contrôle développées au chapitre 3 en vue d'obtenir une navigation efficace, prédictible, confortable et semblable à celle des usagers habiles. Chaque manoeuvre automatique coopère avec l'assistant stratégique du chapitre 4, lequel s'assure de la sécurité des déplacements et contribue au déblocage.

Au premier et deuxième niveau d'autonomie, les fonctionnalités opèrent en environnement inconnu. La pose de la plate-forme est évaluée par intégration des vitesses et les glissements de la plate-forme ne sont pas compensés. Ceci affecte surtout la précision des manoeuvres de mouvements rectilignes et de pivotements. Pour les manoeuvres de suivi de murs, de suivi de personnes, de stationnement et de traversée de passage étroit, un suivi en temps réel de la configuration des objets relatifs à la manoeuvre compense l'effet du glissement.

Les obstacles sont pris en considération sur une carte d'occupation dynamique. Cette dernière est dotée d'une mémoire court terme permettant d'oublier les obstacles perçus au-delà d'un délai, ce qui est essentiel pour effacer l'effet des glissements et des objets mobiles.

Le contournement d'obstacle résulte d'une interaction entre les modules maîtres, responsables des stratégies, et de l'assistant stratégique. Au premier niveau d'autonomie, l'assistant permettra la réalisation d'un contournement d'obstacle si la commande de l'utilisateur est cohérente avec cette action. Au deuxième niveau d'autonomie, la réalisation d'un contournement d'obstacle sera observée

pour un suivi de mur, un mouvement rectiligne ou une traversée de passage étroit dans un couloir. Pour les autres tâches, d'autres actions sont souvent préférées, telles que revenir en arrière, aller dans une autre direction, etc. Comme le module stratégique effectue une assistance implicite, l'évitement d'obstacle relatif à chaque tâche est poursuivi par défaut tant que l'utilisateur ne commande pas l'arrêt ou une tâche différente.

Au troisième niveau d'autonomie, la fonctionnalité de navigation globale repose sur la technique d'autolocalisation du chapitre 8 et sur la méthode de suivi de séquence de points de passage du chapitre 3. Cependant, la navigation globale a seulement été testée sur un mini ATRV et n'est pas encore opérationnelle dans notre SNSA.

9.2.1 Réalité virtuelle

La réalité virtuelle comprend une plate-forme mobile, un environnement statique et un environnement dynamique.

Plate-forme mobile virtuelle

La *plate-forme mobile virtuelle* contient l'information décrivant la plate-forme et son état. Les attributs statiques, fournis dans un fichier de configuration, incluent la géométrie 2D (décrite par une séquence de points de contour), son poids, son inertie, les capteurs utilisés (incluant des télémètres, des sonars et des capteurs télémétriques à infrarouges), leurs configurations et leurs positions. Les attributs transitoires comprennent la position de la plate-forme, ses vitesses de déplacement et les lectures des capteurs de proximité. Les fonctions donnent un accès direct aux valeurs des attributs ainsi qu'une information extraite des valeurs des attributs de base.

Par exemple, les points d'occupation liés aux mesures valides des capteurs de proximité sont fournis (dans le repère de la plate-forme ou d'une carte). Les points d'occupation issus de mesures virtuelles peuvent également être obtenus par une projection de la plate-forme à une pose donnée de l'environnement (statique ou dynamique).

Environnement statique

L'environnement statique comporte une carte d'occupation provenant d'une image en mémoire. La dimension de l'environnement virtuel est spécifiée dans les options de configuration, ce qui permet de calculer les coordonnées réelles des points d'occupation (en unité métrique plutôt qu'en pixel). En balayant la carte, les fonctions d'accès fournissent les points d'occupation et les distances de proximité des obstacles selon les poses de référence spécifiées, ce qui revient à utiliser le concept de *capteurs virtuels* (ou *virtual sensors*) de Rofer et Lankenau (2000).

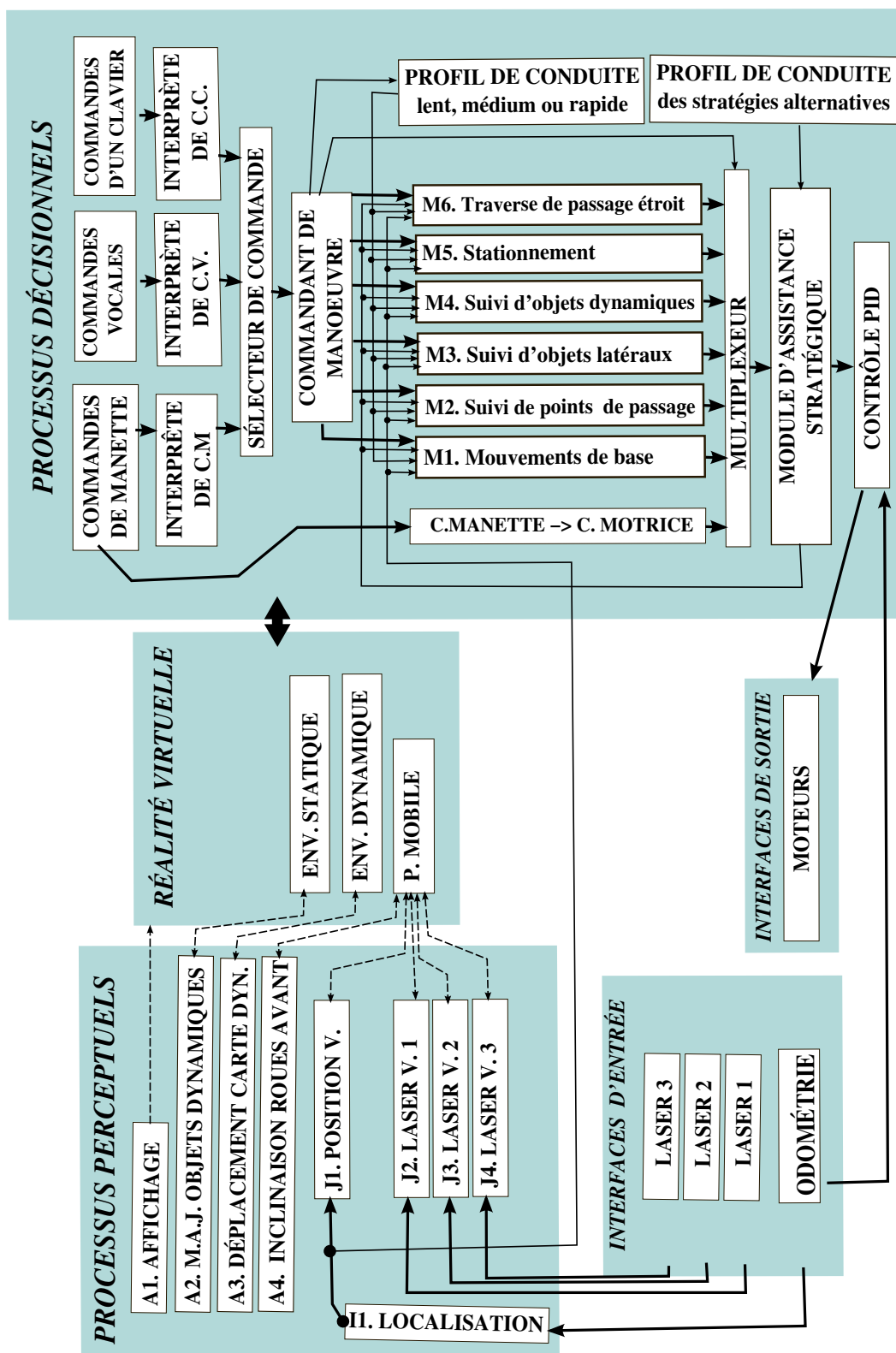


Figure 9.1 Architecture de navigation utilisée pour l'application de FRMSA.

Environnement dynamique

L'environnement dynamique sert de mémoire à court terme, permettant de prendre en considération des obstacles qui furent temporairement détectés par les capteurs de proximité. L'information de la carte évolue en temps réel.

La carte est représentée par une grille de couleurs. Chaque couleur comprend une concentration de rouge, de vert, de bleu et d'une intensité. Actuellement, les couleurs sont choisies afin d'obtenir un affichage *esthétique*, mais pourront éventuellement correspondre à celles des objets perçus. L'intensité est utilisée pour représenter la probabilité d'occupation de la position correspondante (de zéro à un) : une intensité nulle signifie qu'il n'y a pas d'obstacle à la position donnée, tandis qu'une intensité unitaire implique qu'il y ait assurément un obstacle.

La présence d'objets mobiles dans l'environnement et l'incertitude liée à la position relative des obstacles précédemment observés² imposent que chaque point d'occupation détecté ait une durée de vie limitée. Pour ce faire, chaque position discrète est associée à un chronomètre spécifique, lequel décroît à intervalle de temps fixe sa probabilité d'occupation (l'intensité de sa couleur). Ainsi, la probabilité d'occupation d'une position augmentera lorsqu'un obstacle est détecté à cet endroit, puis diminuera graduellement avec le temps jusqu'à devenir nulle.

Afin d'assurer la rapidité des traitements, la carte dynamique se situe sur une fenêtre limitée de l'environnement et à une position qui suit celle de la plate-forme mobile. Pour éviter d'avoir à déplacer la fenêtre à chaque instant, elle se recentre sur la plate-forme uniquement lorsque cette dernière s'est rapprochée de ses frontières en deçà d'une distance critique. Chaque déplacement de la carte maintient l'information relative aux points d'occupation encore présents à la nouvelle position.

Les points d'occupation et les distances de proximité sont accessibles aux processus via des fonctions similaires à celles utilisées pour la carte statique.

9.2.2 Processus perceptuels

Interprétation des mesures

Réalisé par filtrage de Kalman, le module de localisation *I1* estime la pose de la plate-forme en temps réel en fusionnant les mesures de vitesses aux mesures relatives aux points d'occupation. Pour ce faire, une fusion est réalisée entre les points réels, directement fournis par la plate-forme, et les points virtuels, fournis par la plate-forme via l'environnement statique. La méthode est détaillée au chapitre 8 et résumée dans (Boucher *et al.*, 2009). En environnement complètement inconnu (tel que celui utilisé pour les tests au Centre de réadaptation Lucie-Bruneau), ce module est remplacé

²Notez que l'incertitude vis-à-vis la position relative des points d'occupation antérieurs est liée à l'imprécision de la localisation.

par un second module effectuant une simple intégration de vitesse.

Mise à jour de la réalité virtuelle

Les processus $J1$ à $J4$ actualisent la position de la plate-forme et les mesures des trois télémètres lasers virtuels. Les mesures hors de la plage de valeurs admissibles sont détectées afin de ne pas intervenir dans l'extraction des points d'occupation de l'environnement.

Abstraction de l'information

Le module d'affichage $A1$, réalisé en OpenGL, est surtout utile aux fins de conception des unités de l'architecture. En effet, la visualisation de l'information à la base des décisions permet de déceler rapidement si elles sont adaptées ou non. Ceci permet également de déceler rapidement des problèmes matériels³. Ce module procède tout simplement en appelant séquentiellement les fonctions d'affichage de chaque unité virtuelle.

Le module $A2$ de mise à jour des objets dynamiques obtient les points d'occupation de la plate-forme virtuelle et les dessine sur l'environnement dynamique. De plus, il appelle périodiquement une fonction de l'environnement dynamique qui vérifie les chronomètres responsables de limiter la durée de vie des points d'occupation.

Le module $A3$ se charge de déplacer l'environnement dynamique lorsque la plate-forme s'approche de ses frontières en deçà d'une distance critique.

Le module $A4$ évalue l'inclinaison des roues folles, lesquelles ont un impact important sur la dynamique du fauteuil. Notez que l'inclinaison des roues folles est prise en compte dans le contrôleur dynamique.

9.2.3 Banque de comportements

Les comportements sont implémentés en des classes distinctes de manière à être facilement réutilisables d'un processus à l'autre. Les comportements les plus réutilisés sont :

- (C1) : les mouvements cinématiques de bases, tels que le changement d'orientation et le parcourt d'une distance (équations cinématiques du chapitre 3) ;
- (C2) : le suivi de séquence de points de passage (chapitre 3) ;
- (C3) : le suivi de droites (suivi de segments, chapitre 3).

³Par exemple, la plate-forme virtuelle ne suit pas le mouvement de la plate-forme réelle lors d'un problème au niveau des capteurs de vitesse ; les points d'occupation semblent décalés de ceux réellement observés dans l'environnement lorsqu'un capteur de proximité est mal positionné, etc.

9.2.4 Processus décisionnels

L'architecture est structurée de manière à répondre aux commandes de haut-niveau d'un usager de fauteuil roulant motorisé (FRM), lesquelles sont transmises via le clavier, la manette de jeu et l'interface vocale. Ces commandes sont résumées à la table 9.1. La deuxième colonne indique les différentes directions dans lesquelles la commande peut être appliquée, la troisième donne la signification de la valeur numérique relative à la commande. Les trois dernières colonnes indiquent quels sont les comportements de la banque utilisés («o» si utilisé, «n» sinon).

Le *sélecteur de commande* transmet la commande la plus récente au *commandant de manoeuvre*. À partir de la commande de haut-niveau, le commandant de manoeuvre sélectionne un profil de vitesse approprié, le spécialiste de manoeuvre utilisé et ajuste son interface d'entrée. Le multiplexeur transmettra alors la sortie du spécialiste sélectionné à l'assistant d'évitement de collision. Le contrôleur dynamique appliquera enfin une commande visant à produire les vitesses prescrites par l'assistant.

Les spécialistes de manoeuvres effectuent un contrôle cinématique basé sur un profil spécifiant les vitesses, accélérations maximales et les paramètres de conduite (voir la table 3.3 du chapitre 3). Trois profils de vitesse sont offerts : lent, moyen ou rapide. Le profil de vitesse est sélectionné par l'usager. Chaque spécialiste de manoeuvres, l'assistant d'évitement de collision et le contrôleur dynamique sont détaillés ci-dessous.

M1. Mouvement de base Les mouvements de base incluent l'avancement et le recul en ligne droite dans une direction spécifiée parmi huit directions, et le pivotement gauche-droit selon un angle donné. Lorsqu'un déplacement en ligne droite est commandé, selon une direction désirée relative à celle de la plate-forme, une droite de référence est construite sur la position courante de la plate-forme avec un angle conséquent. Le comportement C3 de suivi de droite permet dès lors l'exécution de la manoeuvre. La longueur du parcourt peut également être fixée.

Tableau 9.1 Commandes de l'utilisateur disponibles.

| <i>Manoeuvres</i> | <i>Direction</i> | <i>valeur</i> | <i>C1</i> | <i>C2</i> | <i>C3</i> |
|-------------------------------|------------------------|---------------|-----------|-----------|-----------|
| Mouvement de base | ←, ↖, ↑, ↗, →, ↘, ↓, ↙ | distance | o | n | o |
| Pivotement | ←, → | angle | o | n | n |
| Suivi d'objets latéraux | ←, → | distance | o | n | o |
| Stationnement | ←, ↑, →, ↓ | distance | o | n | o |
| Suivi d'objets dynamiques | ↑ | - | o | o | n |
| Traversée d'un passage étroit | ↑ | - | o | o | n |

M2. Suivi de points de passage Ce module permet la navigation point à point autonome. Le suivi de point de passage fourni par le comportement C2 est directement employé (voir chapitre 3).

M3. Suivi d'objets latéraux Ce module est pratique pour diminuer l'effort de contrôle lorsque la plate-forme peut poursuivre parallèlement aux objets à ses côtés (typiquement des murs) pour aller à l'endroit désiré. Une droite est construite à chaque instant à partir des objets latéraux avec une technique analogue à celle utilisée pour le stationnement (voir chapitre 7). Le comportement de suivi de droite C3 assure alors l'exécution.

M4. Suivi d'objets dynamiques Le suivi d'objets dynamiques permet au fauteuil de suivre un guide, tel un humain ou un chien guide. Cette méthode comprend deux problématiques : suivre la position de la cible et établir la commande assurant son suivi. Au moment de l'application de la commande, la cible est considérée comme étant sur le point d'occupation le plus près de l'avant de la plate-forme. Ensuite, la cible retenue correspond au point d'occupation le plus rapproché de la cible précédente⁴. La technique de suivi de séquence de points de passage C2 est alors utilisée par l'avant de la plate-forme (telle que décrit à la section 6.3.3 du chapitre sur la traversée de passages étroits). La séquence de points est ajustée de manière différente selon le mode. En mode *suivi direct*, la suite comporte un seul point actualisé à la position courante de la cible. En mode *suivi de trajectoire*, la séquence de points décrit la trajectoire de la cible⁵.

M5. Stationnement La manoeuvre de stationnement, expliquée en détails au chapitre 7, vise à positionner la plate-forme près d'une structure de l'environnement dans une direction désirée, ce qui s'avère pratique pour libérer la voie de circulation lors d'une pause ou pour permettre à l'utilisateur de s'approcher d'un objet où il doit se transférer (comme un lit). La pose de stationnement est toujours réévaluée de manière à demeurer précise malgré les erreurs de localisation (principalement dues aux glissements). Le module se base sur une machine à états exploitant la technique de suivi de droites C3 et collaborant avec l'assistant d'évitement de collision.

M6. Traversée de passages étroits La traversée de passage étroits comporte trois défis détaillés au chapitre 6 : (1) détecter le passage étroit ; (2) construire et mettre à jour une trajectoire traversant le passage et (3) traverser le passage à l'aide de la technique de suivi de points de passage C2 et en collaborant avec l'assistant d'évitement de collision.

⁴Notez que cette approche n'est pas robuste en environnement restreint. Une meilleure robustesse pourrait être obtenue en évaluant la vitesse de déplacement de la cible (en utilisant un filtrage de kalman) et en effectuant une analyse de la carte dynamique identifiant les points d'occupation appartenant à la cible.

⁵Idée de Hai Nguyen.

9.2.5 Module d'assistance stratégique

Cet assistant a pour rôle : (1) d'évaluer les contraintes de mouvement selon la géométrie de la plate-forme en relation étroite avec les obstacles environnants et (2) de proposer une commande sécuritaire s'approchant le plus de la stratégie désirée en terme d'objectifs de mouvement, de transfert spatial et d'évitement d'obstacle (voir chapitre 4). Notez que les vitesses des stratégies alternatives sont contraintes par un profil spécifique.

Les contraintes de mouvements sont retournées aux spécialistes de manoeuvres qui peuvent alors adapter leurs comportements en conséquence.

9.2.6 Contrôleur dynamique PID

Utilise un contrôle proportionnel-intégral-dérivé pour assurer le respect des vitesses de référence de l'assistant à l'évitement de collision. L'inclinaison des roues avant est prise en considération afin d'augmenter la robustesse de la commande. Ce module permet à la plate-forme de naviguer sur des pentes ascendantes, descendantes et sur des surfaces granuleuses telles que sur du gravier.

9.2.7 Entrées/sorties et simulation

En utilisation réelle, les interfaces d'entrée et de sortie sont fournis par des processus communiquant avec des pilotes matériels. En simulation, les processus communiquent plutôt avec la réalité simulée.

Utilisation réelle, pilotes matériels

Les pilotes matériels, implémentés en des singletons, sont responsables de la communication avec les équipements de mesures et de commandes. L'unité de vision communique avec les trois télémètres Hokuyo-lasers en utilisant la librairie *GearBox Project* Makarenko *et al.* (2007). L'unité de contrôle assure la communication avec le circuit de commande en accédant aux données odométriques et aux commandes motrices. Elle est aussi dotée d'une fonctionnalité évoluée identifiant la commande motrice requise pour produire les vitesses de référence, une tâche qui s'est avérée assez complexe dans notre application en raison de la non-linéarité de la réponse du système.

Simulation

Les interfaces matérielles ont été remplacées par des interfaces exploitant des unités réelles simulées (RS). Les données RS des lasers sont fournis par la plate-forme virtuelle en projetant

ses lasers virtuels dans l'environnement RS. La réponse dynamique du fauteuil RS est obtenue en tenant compte de l'impact de ses roues folles. La réalité RS peut également être affichée.

9.3 Prototype

Un fauteuil roulant motorisé commercial *Quikie S-646* de *Sunrise Medical*, représenté à la figure 9.2, est utilisé pour les tests. Ce dernier est équipé de trois télémètres lasers Hokuyo, chacun ayant un champ de vision de 270 degrés et une résolution angulaire de 0.36 degré. Les obstacles sont ainsi détectés sur 360 degrés autour de la plate-forme à l'extérieur d'une zone morte qui lui est très rapprochée, comme il est illustré sur la figure 9.3. Un circuit électrique a été réalisé pour exploiter la capacité de locomotion du fauteuil commercial.

L'asservissement du FRM est réalisé par deux boucles de contrôle PID ayant pour référence une vitesse linéaire et une vitesse angulaire. Cet asservissement est essentiel au succès de manoeuvres effectuées sur des plans inclinés et sur des surfaces molles.

9.4 Conclusion

Ce chapitre a résumé le SNSA proposé. En se basant sur les principes du chapitre 5, nous avons décrit l'architecture de contrôle coordonnant l'ensemble des fonctionnalités développées dans les chapitres précédents, comprenant la génération du mouvement (chapitre 3), la réaction aux obstacles (chapitre 4), les manoeuvres évoluées de traversée de passages étroits (chapitre 6), de stationnement (chapitre 7) et l'autolocalisation (chapitre 8). Le chapitre suivant démontrera les performances et la pertinence du SNSA en lumière aux résultats des expériences effectuées sur le prototype.



Figure 9.2 Fauteuil roulant motorisé adapté, utilisé pour les tests.



Figure 9.3 Champ de vision du prototype.

CHAPITRE 10

EXPÉRIMENTATIONS

Ce chapitre décrit le contexte d'expérimentation du système de navigation semi-autonome, les résultats des tests concernant l'aspect personne-machine et les habilités de navigation.

10.1 Contexte d'expérimentation

10.1.1 Test de validation WST

La capacité du FRMSA à assister convenablement des usagers est évaluée par un test standard d'habilité à naviguer en fauteuil roulant. Ce test est connu sous le nom de WST (Wheelchair Skills Test), décrit dans le manuel (Manual-WSTP4.1, 2008). Dans le test WST, l'utilisateur doit démontrer sa capacité à naviguer d'une manière autonome en exécutant, dans un environnement standardisé, plusieurs manoeuvres typiques d'une navigation quotidienne¹. Parmi les tâches les plus critiques, nous retenons : manoeuvrer latéralement en lieu encombré, passer une porte, se transférer à un banc, rouler sur un plan incliné latéral, monter et descendre des plans inclinés de 5 et 10 degrés et rouler sur une surface molle (sur du gravier).

Certaines tâches n'ont pas été testées pour la sécurité du prototype en raison des vibrations importantes qu'elles peuvent induire, soient la montée et la descente d'un dénivellement de 5 cm et le passage d'un trou de 15 cm.

La descente du plan incliné de 5 degrés est présentée sur la figure 10.1 et le passage du gravier sur la figure 10.2. La porte employée, dont les deux faces sont présentées sur les figures 10.3 et 10.4, a une largeur de 86 cm. Cette largeur laisse 18 cm d'espace libre au fauteuil lors de la traversée (étant donnée sa largeur de 68 cm). Le couloir utilisé pour la tâche d'avancer de 100 mètres est illustré à la figure 10.5. Le stationnement, présenté à la figure 10.6, comporte une profondeur de 1.50 m et une largeur de 1.5 m. Le fauteuil est contraint à ne pas s'éloigner du stationnement de plus de 1.50 mètres.

10.1.2 Procédure de test avec les usagers

Les expériences sont réalisées en deux phases au centre de réadaptation Lucie-Bruneau à Montréal. Lors de la première phase, 8 cliniciens (7 ergothérapeutes et 1 technicien en réadaptation) ont effectué les tests du WST 4.1 avec différents types d'interfaces.

¹La liste exhaustive des habilités testées est à l'annexe C.

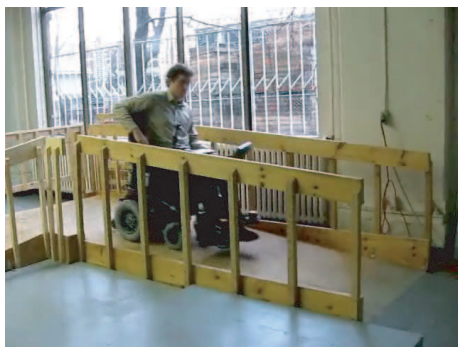


Figure 10.1 Roulement sur un plan incliné descendant.



Figure 10.2 Roulement sur une surface molle.



Figure 10.3 Passage d'une porte, face 1.



Figure 10.4 Passage d'une porte, face 2.



Figure 10.5 Parcours de 100 mètres dans le couloir.



Figure 10.6 Transfert latéral, stationnement en lieu encombré.

Lors de la deuxième phase, 9 usagers handicapés prennent le relais. Parmi les usagers handicapés, 3 souffrent de maladie évolutive, 4 de maladie neurologique stable (3 de blessures médullaires et 1 d'un ACV), 2 présentent des troubles orthopédiques²

Avant les tests, chaque usager doit se familiariser au contrôle et aux comportements du FRMSA. L'interface vocale y est entraînée pour améliorer le taux de reconnaissance de la voix. Une fois bien familiarisé avec le système, l'usager effectue d'abord le parcours sans assistance avec la manette standard du FRM³.

Chaque usager sain effectue ensuite le parcours trois fois en exploitant l'assistance du SNSA avec chaque interface de commande, comprenant une interface par manette de jeu, par commande vocale et par clavier. Les sujets handicapés utilisent seulement le SNSA avec la commande vocale (le clavier et la manette de jeux sont alors retirés du système durant les tests).

L'usager commande la manoeuvre qu'il juge la plus adaptée à la circonstance, bien que l'ergothérapeute le guide au besoin en lui expliquant les conséquences du choix de chaque manoeuvre.

Après l'évaluation, chaque usager est interrogé sur son appréciation des interfaces de commande et des fonctionnalités de navigation.

10.1.3 Configuration

Les processus sont tous exécutés à une fréquence de 10 Hz.

Trois profils de conduite sont disponibles, présentés au tableau 10.1.

Pour l'assistant stratégique, la distance minimale avec les obstacles est de 4 cm et la distance minimale κ pour qu'une stratégie soit admissible est de 12 cm. La décélération cible a_{max}^{obs} d'approche des obstacles est de $7cm/s^2$. Les poids des objectifs sont fixes et identiques pour l'ensemble des manoeuvres : $\{\gamma^{LIN} = 1, \gamma^{ANG} = 1, \gamma^{MOV} = 5, \gamma^{DIR} = 0.5, \gamma^{APP} = 0.5, \gamma^{CNT} = 1, \gamma^{OFM} = 0.3\}$. La géométrie précise de la plate-forme est représentée à la figure 10.7. Cette dernière est asymétrique, car le fauteuil comporte un support à sa droite pour la manette de jeu et pour le clavier.

La distance de suivi de mur est de 65 cm du centre de la plate-forme (environ 31 cm de son périmètre). Les poses de stationnements se situent à une distance de 40 cm (4.5 cm de son périmètre) des obstacles avec une précision transversale $\epsilon^{(per)}$ de $\pm 12cm$. La précision longitudinale $\epsilon^{(para)}$ de la pose de stationnement est de 10 cm et la précision sur l'orientation $\epsilon^{(\phi)}$ est de 2 degrés⁴.

²Un usager comportant une blessure médullaire n'a pu réaliser les tests en raison d'incapacités dues à sa médication. Autrement, 10 usagers handicapés auraient réalisé les tests.

³Afin de faciliter la comparaison entre la conduite standard et assistée par le SNSA, le profil de vitesse du FRM (relatif aux paramètres internes du contrôleur commercial) est configuré de manière à produire une vitesse de déplacement comparable à celle observée avec le SNSA.

⁴En pratique, l'erreur de localisation diminue la précision réelle de la pose de stationnement.

| Paramètres | Unité | Profil lent | Profil médium | Profil rapide |
|----------------|--------------------|-------------|---------------|---------------|
| v_F | m/s | 0.40 | 0.60 | 1.00 |
| v_B | m/s | 0.25 | 0.40 | 0.40 |
| ω_{max} | rad/s | 0.40 | 0.60 | 0.80 |
| a_{max} | m/s ² | 0.40 | 0.40 | 0.40 |
| a_s | m/s ² | 0.50 | 0.40 | 0.40 |
| α_{max} | rad/s ² | 0.40 | 0.40 | 0.40 |
| α_s | rad/s ² | 0.50 | 0.40 | 0.50 |
| λ | - | 1.80 | 1.80 | 1.5 |
| β | 1/rad | 6 | 6 | 6 |

Tableau 10.1 Configuration des trois profils de conduite.

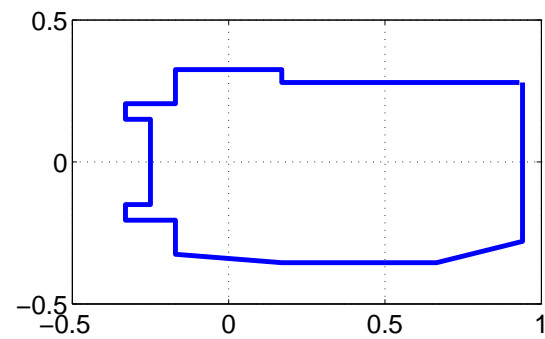


Figure 10.7 Périphérie du prototype considéré pour l'évitement de collision.

10.2 Résultats et discussion

Cette section, réalisée en collaboration avec les ergothérapeutes ayant évalué le FRMSA, mettra en perspective les points positifs et négatifs du SNSA quant au rapport personne-machine et aux fonctionnalités.

Les performances de notre SNSA sont comparées sur plusieurs plans à celles présentées par Levine *et al.* (1999), Sgouros (2002) et Montesano *et al.* (2010), soient les seuls auteurs de la revue bibliographique ayant réalisé des expérimentations en contextes d'opération réels démontrant à la fois les aptitudes et la robustesse de leur système.

Le tableau 10.2 résume l'envergure des tests WST, en terme du nombre de tests effectués, de la durée des expérimentations et des distances linéaires et angulaires minimales parcourues⁵. Les statistiques sont indiquées pour les usagers sains (S), handicapés (H) et pour les deux groupes combinés. Le SNSA a ainsi été utilisé par 17 usagers aux fins de 32 évaluations WST, parcourant au moins 8.8 kilomètres et complétant 1036 révolutions⁶ sur une durée de 25 heures.

À titre comparatif, le SNSA le plus testé parmi les précédents (Montesano *et al.*, 2010), en terme de distance parcourue et de temps de tests, a parcouru avec quatre usagers 344 mètres (25 fois moins que notre système) sur une durée de 2 heures 7 minutes. De plus, aucun des systèmes précédents n'a utilisé une procédure de test standard reconnue dans le domaine de la réadaptation.

10.2.1 Résultat du WST

Les scores des tests WST avec et sans SNSA sont résumés au tableau 10.3 selon le type d'utilisateur.

Au tableau D.1 en annexe, on remarque que tous les usagers ont bien réussi le test sans assistance. La moyenne est de 93% en habilité et de 100% en sécurité. Les usagers handicapés ont bien performé avec une moyenne de 86% en habilité et de 100% en sécurité. Les usagers peuvent donc déjà assurer convenablement leurs déplacements quotidiens sans SNSA et ne sont donc pas nécessairement représentatifs de la clientèle ciblée, laquelle pourrait toucher davantage les personnes éprouvant des difficultés à réussir le WST.

Avec le SNSA, le score baisse de 4% en habilité et de 9% en sécurité, causant des valeurs néanmoins élevées respectivement de 89% et 91%. On démontrera au tableau 10.4 que l'interface de commande utilisée influence de manière significative les scores WST.

Ces expériences démontrent ainsi qu'il est possible d'utiliser le FRMSA proposé pour la navi-

⁵Les distances parcourues présentées sont obtenues avec les fichiers de sauvegarde automatique des expérimentations. Comme certains fichiers ont été perdus (correspondant aux données non disponibles des tableaux D.1 à D.16 en annexe), les distances réellement parcourues n'ont pu être évaluées.

⁶Le nombre de révolutions est obtenu en additionnant les variations d'orientation sans égard au sens horaire ou antihoraire.

Tableau 10.2 Envergure des expérimentations réalisées avec le WST.

| Usager | Sans assistance | | | | Avec SNSA | | | | Total | | | |
|--------|-----------------|-----------------|-------------------|--------------------|-----------------|-----------------|-------------------|--------------------|-----------------|-----------------|-------------------|--------------------|
| | Nombre de tests | Durée des tests | Distance linéaire | Distance angulaire | Nombre de tests | Durée des tests | Distance linéaire | Distance angulaire | Nombre de tests | Durée des tests | Distance linéaire | Distance angulaire |
| | nb | h/min | m | rev. | nb | h/min | m | rev. | nb | h/min | m | rev. |
| S | 8 | 2h38 | 1548 | 161 | 23 | 16h15 | 6436 | 758 | 31 | 18h53 | 7984 | 919 |
| H | 9 | 3h41 | 1849 | 196 | 9 | 8h42 | 2381 | 278 | 18 | 12h23 | 4230 | 474 |
| Tot | 17 | 6h19 | 3397 | 357 | 32 | 24h57 | 8817 | 1036 | 49 | 31h16 | 12214 | 1393 |

gation intérieure quotidienne. Elles ne permettent toutefois pas de conclure quant à l'amélioration du score WST que permettrait l'utilisation du FRMSA par une clientèle plus en besoin.

10.2.2 Interaction personne-machine

Comme il a été introduit à la revue de littérature au chapitre 2, l'interaction personne-machine se définit selon différentes facettes, dont la facilité : à comprendre les fonctionnalités, à les choisir correctement en fonction de ses objectifs et à les commander via une interface de commande. Par ailleurs, une interaction personne-machine efficace suppose que le système soit cohérent aux attentes des usagers et qu'il soit donc prévisible. Chaque facette est détaillée ci-dessous.

Compréhension des fonctionnalités

Dans l'ensemble, les comportements des manoeuvres résultant de chaque commande étaient rapidement compris par les usagers, une compréhension qui a rendu possible l'emploi de commandes inattendues pour la réalisation d'une même tâche. Pour le passage du gravier, les ma-

Tableau 10.3 Résultat du WST

| Usager | Sans assistance | | | | Avec SNSA | | | |
|--------|-----------------|----------|----------|-------|-----------|----------|----------|-------|
| | Nb tests | Habileté | Sécurité | Durée | Nb tests | Habileté | Sécurité | Durée |
| | nb | % | % | min | nb | % | % | min |
| S | 8 | 100 | 100 | 20 | 23 | 97 | 94 | 42 |
| H | 9 | 86 | 100 | 25 | 9 | 82 | 89 | 65 |
| Tot | 17 | 93 | 100 | 22 | 16 | 89 | 91 | 54 |

noeuvres d'avancer tout droit ou de suivre le mur au côté du gravier ont souvent été utilisées. De manière analogue, les plans inclinés pouvaient être montés en effectuant un suivi de mur (de la rampe) ou en avançant en ligne droite à partir de la base. Pour la tâche du 100 mètres, le suivi de mur était normalement utilisé en conjonction au mouvement rectiligne aux endroits où aucun mur ne permettait de s'aligner correctement. Un usager sain a toutefois essayé la manoeuvre de passage de porte pour naviguer dans le couloir, laquelle s'est avérée assez efficace et réutilisée par la suite pour la majorité des sujets handicapés. Un usager a eu l'initiative d'employer la commande de stationnement afin de s'approcher de l'étagère pour la prise de l'objet à 1.5 mètre de haut. Trois usagers ont effectué le virage de 90 degrés en mode avant en utilisant la commande de suivi de mur, exploitant le coin de mur près du fauteuil. Les usagers se sont ainsi approprié les fonctionnalités au sens qu'ils ont pu généraliser leurs utilités à des situations variées.

Notons néanmoins que cette appropriation aurait plausiblement été plus complète si les usagers auraient disposé de plus de temps pour s'habituer au SNSA. Étant donné la période d'entraînement assez courte (que de 30 minutes pour les usagers handicapés), l'ergothérapeute devait régulièrement accompagner les usagers dans leurs raisonnements en proposant des choix de manoeuvre ou en leur offrant des explications.

Exploitation des fonctionnalités

Nous évaluons l'effort requis pour commander le système par le nombre d'annulations des commandes automatiques, par leur durée moyenne (voir tableau 10.6), par la durée totale des tests WST (voir tableau 10.3) et, bien attendu, par les commentaires et les attitudes des usagers.

Le pourcentage d'annulation donne une idée de la difficulté à commander une manoeuvre. Cette difficulté dépend à la fois de l'interface de commande utilisée et de la nature de la manoeuvre (ce deuxième aspect étant prépondérant au tableau 10.6). Les manoeuvres de mouvements rectilignes, de suivi de murs et de passage de porte apparaissent comme étant particulièrement faciles à employer vu leur taux d'annulation assez bas, respectivement de 2.6%, 4.1% et 9.5%. Par contre, les manoeuvres de stationnement et de suivi de personnes apparaissent plus difficiles à initier avec des taux d'annulation de 45.1% et de 33.3%. Cette difficulté est fonction de la précision avec laquelle la plate-forme doit être positionnée lors de l'application de la commande. Lors de l'initiation du stationnement par exemple, la pose de stationnement cible doit être dans la direction logique commandée. Or, cette exigence encourage l'utilisateur à être plus précis en répétant la commande toujours avec une meilleure configuration de départ. En contrepartie, ces manoeuvres libèrent l'utilisateur pour une période de temps supérieure à celles des manoeuvres plus faciles à initier. Remarquons que le pourcentage d'annulation peut aussi être inférieur pour les manoeuvres fortement utilisées puisque les usagers s'habituent à les commander.

La durée moyenne des manoeuvres automatiques donne un indice du besoin d'intervention des

usagers. À cet égard, les approches de suivi de personne et de stationnement comportent effectivement les périodes sans intervention les plus prolongées, lesquelles avoisinent les quarante secondes. Les manoeuvres automatiques ne durent pas en moyenne en deçà de 12 secondes.

Au tableau 10.4, on remarque que la durée totale des tests varie largement selon l'interface de commande utilisée. Pendant que la conduite non assistée a une durée moyenne de 20 minutes chez les usagers sains (voir tableau 10.3), les conduites assistées par manette de jeu, par commande vocale et par clavier ont une durée moyenne respectivement de 32, 60 et 32 minutes. Les scores WST diffèrent également d'une interface à l'autre. En somme, ceci suggère fortement que la facilité à exploiter les fonctionnalités dépend en grande partie de l'aisance à les commander via les interfaces et aux capacités particulières d'adaptation des usagers à ces interfaces.

Exploitation des interfaces de commande

Les principes d'utilisation des interfaces de commande causaient également peu de problèmes, mais plusieurs difficultés s'observèrent en pratique. Les principales difficultés comprenaient les délais de réponse, le contrôle des déplacements par manette de jeu et la robustesse de la reconnaissance de la voix pour l'interface vocale. Comme il a été présenté au tableau 10.4, l'interface employée influence les performances du WST.

Les délais compliquent le contrôle en exigeant un besoin constant d'anticipation afin de commander les actions toujours à l'avance. Le délai était particulièrement problématique pour l'action d'arrêter, puisque cette action est souvent issue d'une réaction soudaine au contexte qui exige une réponse rapide (par exemple lorsque le fauteuil dépasse la position cible de l'utilisateur). Les délais étaient plus prononcés avec la commande vocale (de l'ordre de 3 secondes contre 0.5 seconde pour les autres).

Le contrôle des déplacements granulaires avec la manette de jeu fut peu apprécié en raison des délais (le délai de 0.5 seconde reste problématique pour un contrôle continu), de la force requise pour bouger la manette et, en somme, par le mouvement généré en réponse à la commande de mouvement. Par contre, la commande des fonctionnalités évoluées à l'aide des boutons n'a apparemment pas causé de problème notable. De plus, les usagers n'ont démontré aucune contrariété par l'inhibition de leur commande à l'approche des obstacles et par les réactions de déblocage, ce qui suggère que l'effet de l'assistant stratégique soit cohérent à leur volonté⁷. Malgré les plaintes sur le contrôle granulaire peu intuitif, la commande par manette a généré de bonnes performances moyennes lors des tests WST, avec un temps d'opération moyen de 32 minutes et une moyenne de 0.9 accrochage par test (voir tableau 10.4). Cette performance s'explique, en partie, par la collaboration de l'utilisateur aux mouvements granulaires qui facilite, d'une part, le positionnement du

⁷Il est à noter que les réactions de déblocage sont relativement intuitives et faciles à prévoir. Il est donc facile pour le pilote d'adapter la direction de la manette en vue de générer la réaction désirée.

Tableau 10.4 Résultats, durée et nombre d'accrochages moyen du WST en fonction de l'interface de commande utilisée (usagers sains).

| Interface | Habileté | Sécurité | Temps | Accrochages |
|-----------------------|----------|----------|------------|-------------|
| | % | % | <i>min</i> | nb |
| Manette jeu (moyenne) | 98 | 97 | 32 | 0.9 |
| (écart-type) | 2 | 2 | 15 | 1.1 |
| Clavier (moyenne) | 97 | 98 | 34 | 0.6 |
| (écart-type) | 4 | 4 | 5 | 1.2 |
| Int. vocale (moyenne) | 94 | 88 | 60 | 2.9 |
| (écart-type) | 4 | 8 | 7 | 1.7 |

fauteuil avant l'initiation des manoeuvres automatiques et qui rend possible, d'autre part, l'évolution lorsque le système autonome ne peut opérer convenablement (par exemple si des obstacles environnants sont mal perçus).

La commande par clavier a été globalement bien appréciée pour sa facilité d'utilisation et la prévisibilité des actions commandées. Elle a permis des performances comparables à celles obtenues avec la manette de jeu malgré que les mouvements granulaires soient plus difficiles, les commandes étant que discrètes.

La commande vocale a été la plus difficile à employer. Le taux de reconnaissance des commandes vocales étaient faibles pour certains usagers pour différentes raisons, dont l'entraînement insuffisant du système dans la séance préparatoire, la prononciation de l'utilisateur, la voix de l'utilisateur et la présence de bruits extérieurs lors des tests. Une autre difficulté (discutée à la section 2.2 de la revue littéraire) est de savoir quoi commander pour avoir une action précise, puisque les fonctionnalités disponibles ne peuvent être choisies parmi un ensemble fini comme avec la manette de jeu et le clavier. Or, l'utilisateur doit augmenter son attention afin de définir quoi, quand et comment commander l'action désirée. La concentration requise pour bien définir la commande aurait généré une fatigue importante chez plusieurs usagers (usagers sains 2, 3 et 4), affectant la prise en conscience de l'environnement local⁸ et augmentant ainsi les erreurs de décisions et la quantité de collisions avec des objets non détectables. Ceci peut expliquer pourquoi le score moyen est inférieur à ceux obtenus avec les deux autres interfaces et pourquoi la durée moyenne et le nombre d'accrochages y soient supérieurs.

⁸Les usagers sains 3, 6 et l'utilisateur handicapé 1 auraient eu des problèmes notables concernant la perte de conscience avec l'environnement local.

Prévisibilité et cohérence de l'exécution

Pour l'assistance au premier niveau d'autonomie avec la manette de jeu, les usagers éprouvent de la difficulté à prédire le mouvement résultant de la position de la manette due aux problèmes de délai et aux différences entre les comportements de la manette de jeu et ceux des manettes de FRM commerciaux. La réaction aux obstacles, apparemment assez appréciée, semble néanmoins cohérente aux attentes des usagers.

Au deuxième niveau d'autonomie, les usagers se sont familiarisés rapidement aux manoeuvres automatiques et comprenaient alors assez rapidement *ce que le système essaye de faire*. Par contre, une incertitude est récurrente chez plusieurs usagers au niveau de la capacité du système à réaliser ses plans. Cette incertitude concerne plus particulièrement la réaction aux obstacles. Lors de l'initiation des expériences, les vitesses assez élevées à proximité des obstacles font peur à certains usagers n'ayant pas encore une idée claire de la capacité du système à opérer en ces conditions. Une collision avec un obstacle non détecté par les télémètres lasers a occasionné à maintes reprises une méfiance face aux aptitudes du système de navigation. Cette méfiance n'est toutefois pas généralisée, elle dépend de la personnalité des usagers, de leurs expériences respectives et de leur compréhension du système de navigation. En somme, le système apparaît facile à prévoir pour autant que l'utilisateur puisse identifier les objets mal perçus par les télémètres lasers, que les objets sur le parcours sont, pour la plupart, bien détectés et que les appareils de détection de l'environnement sont bien calibrés.

10.2.3 Comportements de navigation

Cette partie étudie différents aspects relatifs à la navigation qui ont été élaborés dans ce mémoire et exploités dans le SNSA. La génération du mouvement, la réaction aux obstacles et les manoeuvres évoluées sont discutées.

Génération du mouvement

Les vitesses moyennes utilisées par les usagers lors des tests non assistés sont de 0.33 m/s en linéaire et de 0.27 rad/s en angulaire⁹. Lorsque les usagers sont assistés par le SNSA, les vitesses moyennes s'abaissent à 0.24 m/s en linéaire et à 0.18 rad/s en angulaire. Le FRMSA reste néanmoins assez rapide compte tenu de la proximité minimale moyenne des obstacles de 36 cm (40 cm pour les sujets sains et 29 cm pour les sujets handicapés).

⁹Ces distributions et les moyennes des vitesses sont obtenues seulement à partir des vitesses supérieures à un seuil de 0.02 m/s et 0.02 rad/s , pour donner une idée plus réaliste des vitesses linéaires employées lorsque le fauteuil avance et des vitesses angulaires employées lorsqu'il tourne. Autrement, l'action de tourner sans avancer aurait pour conséquence d'abaisser la moyenne des vitesses linéaires, ce qui est équivalent pour l'action d'avancer sans pivoter).

À titre comparatif, la vitesse moyenne de Montesano *et al.* (2010) est de¹⁰ 0.13 m/s pour une proximité minimale moyenne de 77 cm. Celle du système de Sgouros (2002) est de 0.20 m/s pour une proximité minimale moyenne avec les obstacles comparable à celle de Montesano *et al.* (2010)¹¹.

La figure 10.8 présente les distributions des vitesses (en valeur absolue) employées lors des tests par les usagers (sans assistance) et par le SNSA (avec assistance). On remarque une similitude entre la répartition des vitesses employées par les usagers et celle du SNSA : elles suivent des exponentielles décroissantes relativement approchées l'une de l'autre. La fusion de notre approche de génération du mouvement et de réaction aux obstacles se comporte ainsi d'une manière analogue aux usagers en regard de la distribution des vitesses de déplacement qu'ils emploient. Cette similitude peut s'expliquer par le fait que les comportements de conduite, à la base de la génération du mouvement et de la réaction aux obstacles du SNSA, sont inspirés des comportements de pilotes humains. Par exemple, le SNSA et l'utilisateur visent des vitesses de déplacement sécuritaires maximales, réduisent leur vitesse linéaire lorsque le FRM est désorienté par rapport à l'endroit où il doit se diriger et adaptent, d'une manière analogue, les vitesses de déplacement en fonction des obstacles. Ces similitudes entre les comportements de conduite des usagers et du SNSA seraient donc sujettes à induire une distribution similaire des vitesses de déplacement utilisées.

Il appert que cette capacité à exploiter des vitesses de navigation variées, rendue possible par les méthodes de génération de mouvement et d'évitement d'obstacle employées, constitue un aspect primordial à l'efficacité de la navigation. En effet, si notre SNSA utilisait une vitesse linéaire quasi constante, cette vitesse devrait se situer autour de 0.1 m/s pour demeurer sécuritaire et induire des mouvements stables¹², soit une valeur comparable à celle de Montesano *et al.* (2010) et 2.4 fois inférieure à la vitesse moyenne observée actuellement. Une vitesse linéaire quasi constante aurait donc potentiellement doublé la durée de l'exécution des tests, augmentant conséquemment la fatigue des usagers et la complexité logistique des expérimentations¹³. En plus, nous avons observé que la fatigue accroît notablement les erreurs d'utilisation du système (mauvais choix de manœuvre, confusion entre la droite et la gauche, perte de contact avec l'environnement local, perte de synchronisation avec les événements), augmente la frustration et nuit ainsi à l'appropriation du

¹⁰Si on considère la distance totale parcourue sur la durée des tests, la vitesse moyenne de notre système est de 0.11 m/s, contre 0.045 m/s pour Montesano *et al.* (2010).

¹¹La proximité minimale moyenne n'est pas explicitement mentionnée dans l'article. Elle est jugée *comparable* d'après les expérimentations décrites, lesquelles comportent une proximité minimale de 32 cm avec les obstacles (soit la distance minimale d'opération des capteurs employés).

¹²Comme il a été expliqué au chapitre 3, une vitesse linéaire constante élevée peut induire des accélérations centripètes appréciables et de l'instabilité lorsque la trajectoire de référence comporte des zones de faible rayon de courbure. Or, notre système doit couramment parcourir ce genre de trajectoires comportant de brusques changements de direction, notamment lors de la manœuvre de traverse de passages étroits.

¹³Par exemple, plus de séances avec les usagers auraient été nécessaires pour réaliser les expériences (des tests auraient possiblement dû se scinder en deux séances vu l'épuisement des batteries et des usagers).

SNSA. En ce sens, il demeure essentiel de maintenir une exécution suffisamment rapide.

En somme, les usagers apparaissent plutôt satisfaits de la navigation. L'ergothérapeute ayant interrogé les usagers, Wormser Honoré, affirme :

Ils ont dit que les vitesses d'exécution étaient bonnes lorsque le FRMI faisait les tâches, les accélérations et les décélérations sont adéquates. Le comportement du FRMI était prévisible et similaire à l'exécution d'un usager normal. Les distances par rapport aux obstacles étaient appropriées (dans les pentes, dans le corridor). La vitesse de passage de porte aussi.

Il affirme néanmoins que certains usagers auraient préféré des vitesses de croisière supérieures, plus particulièrement pour la navigation dans les couloirs.

Réaction aux obstacles

En moyenne, la conduite assistée par le SNSA a produit 4.7 accrochages et 1.8 effleurements par kilomètre parcouru (pour un total de 41 accrochages et 16 effleurements). Notez que seuls les accrochages causent préjudice à la sécurité de la conduite. Les effleurements constituent des contacts ayant des conséquences négligeables pour l'environnement, le FRM et l'utilisateur. Les effleurements indiquent néanmoins une conduite peu sécuritaire. L'ergothérapeute a réalisé près de 5.2 interventions préventives par kilomètres (46 interventions). Ces interventions préventives surviennent typiquement lorsque l'ergothérapeute ou l'utilisateur doute que le système puisse poursuivre de manière sécuritaire. Ceci est le cas lorsque le risque de collision est jugé élevé (proximité d'obstacles détectables ou non) et lorsque des individus sont présents dans le passage du FRMSA (l'environnement de test étant un espace public).

En se référant au tableau 10.5, on constate que l'utilisation du SNSA, par rapport au contrôle

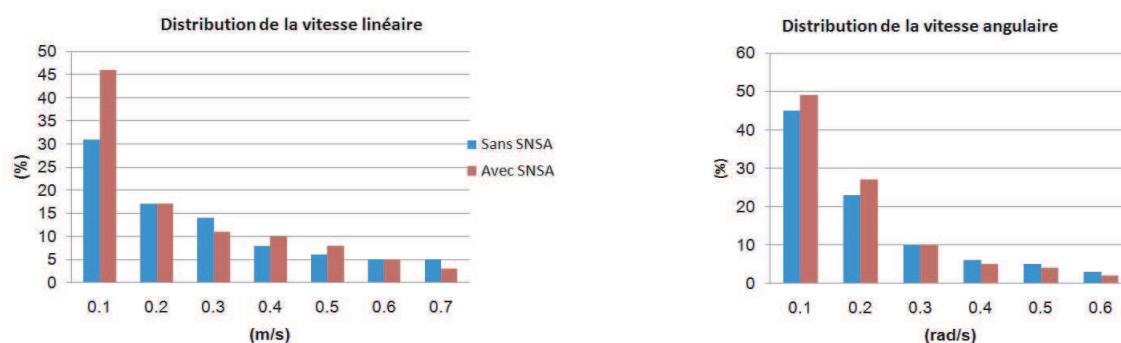


Figure 10.8 Distribution de la vitesse linéaire et angulaire employée lors d'une navigation non assistée et assistée par le SNSA.

standard, a permis une réduction du nombre d'accrochages de 9% et du nombre d'effleurements de 67% chez les usagers sains. Chez les usagers handicapés, le nombre d'accrochages diminue de 40% et le nombre d'effleurement de 93%. Il apparaît donc que le SNSA offre une conduite plus sécuritaire que celle des usagers pour une proximité comparable avec les obstacles (la proximité moyenne avec les obstacles est de 36 cm pour le SNSA contre 40 cm pour le contrôle standard) et des vitesses moyennes légèrement inférieures.

En comparaison, le système de Montesano *et al.* (2010) produirait 17 accrochages par kilomètre¹⁴. Pourtant, la proximité minimale moyenne avec les obstacles du système de Montesano *et al.* (2010) est 2.14 fois supérieure à la nôtre et leur parcours ne contient aucun plan incliné ou surface molle perturbant le contrôle dynamique très près des obstacles (comme dans notre cas avec le passage de gravier longeant un mur et la montée et descente de plans inclinés bornés par des rampes). Ceci confirme l'intérêt de notre méthode de réaction aux obstacles.

La tâche qui a généré le plus d'accrochages est la descente du plan incliné et la prise d'un objet à une hauteur de 1.5 mètres. Les accrochages lors de la descente s'expliquent en premier lieu par les angles morts au niveau des roues latérales (voir figure 9.3), puis par les difficultés du contrôle dynamique. En descendant, la vitesse réelle du fauteuil a tendance à dépasser la vitesse de référence et peut ainsi devenir non sécuritaire compte tenu de la proximité de la rampe. Les collisions lors de la prise de l'objet à 1.5 mètres sont surtout imputables aux problèmes de détection des étagères, les télémètres détectant surtout l'espace libre entre les tablettes. Deux autres tâches critiques furent : *avancer de 100 mètres* et *passer une porte*. Les accrochages lors de ces tâches sont typiquement provoqués par des problèmes de détection des obstacles. Dans les couloirs de la tâche du 100 mètres, certaines surfaces étaient mal perçues par les télémètres laser, comme les surfaces du chariot d'un concierge, d'une poubelle ou de pattes de chaises étroites. La présence de ces objets dans le parcours a aussi encouragé plusieurs interventions préventives. Les accrochages lors du passage de porte étaient surtout imputables à la calibration des lasers ou à des objets non détectés près de la porte. La calibration des lasers (leur position et orientation) était typiquement affectée par des accrochages précédents avec les obstacles ou par les pieds des usagers. Les erreurs de calibration ont également généré 7 blocages de la plate-forme lors du passage de porte au cours de trois tests (dont 3 blocages dans un même test dû à l'imprécision du repositionnement rapide du laser déplacé). Lors d'un blocage, l'ouverture de la porte est perçue plus étroite qu'elle ne l'est en réalité.

Puisque les accrochages étaient souvent à l'origine de d'autres accrochages dus au déplacement des télémètres, le nombre d'accrochages rencontrés s'est avéré particulièrement critique lors de certains tests (voir les tableaux D.4 et D.5 en annexe), notamment le test de l'utilisateur sain 5 avec commande vocale (6 accrochages) et ceux des usagers sains 4 et 7 avec interface vocale (4

¹⁴ 6 accrochages avec intervention sont survenus durant leur expérience sur un parcours de 343.7 mètres.

Tableau 10.5 Nombre de contacts par kilomètre parcouru, avec et sans l'assistance du SNSA.

| Usagers | Sans assistance | | | | Avec SNSA | | | |
|---------|-----------------|-------------------|---------------------|------------------------|----------------|-------------------|-----------|------------------------|
| | Nb contacts/km | Nb accrochages/km | Nb effleurements/km | Nb interventions prév. | Nb contacts/km | Nb accrochages/km | Nb eff/km | Nb interventions prév. |
| S | 11.0 | 5.8 | 5.2 | 0.0 | 20.3 | 5.3 | 1.7 | 4.4 |
| H | 33.0 | 4.9 | 28.1 | 1.1 | 24.4 | 2.9 | 2.1 | 7.6 |
| Moy | 23.0 | 5.3 | 17.7 | 0.6 | 6.4 | 4.7 | 1.8 | 5.2 |

accrochages). La quantité de tests comportant chaque nombre d'accrochages est présentée à la figure 10.9. On observe que la majorité des parcours WST (soit 65%) comportaient un ou aucun accrochage.

En somme, la réaction aux obstacles apparaît excellente compte tenu des vitesses moyennes employées (0.24 m/s) par rapport à la proximité des obstacles (36 cm en moyenne), des perturbations de contrôle liées aux plans inclinés et aux surfaces molles et à la présence d'objets non détectés. En effet, le système de navigation a démontré sa capacité à maintenir des vitesses sécuritaires et à assurer un succès robuste des manoeuvres par la fonctionnalité de déblocage stratégique. Aucun incident ne s'est apparemment produit en raison d'une mauvaise réaction (au niveau de la décision) aux obstacles bien détectés.

Néanmoins, les ergothérapeutes confirment que la quantité d'accrochages reste trop élevée pour une utilisation quotidienne du système. Par exemple, si l'utilisateur navigue deux heures par jour en raison d'une vitesse moyenne de 0.11 m/s (pour un total de 289 km), on aurait environ 1360 accrochages par année en supposant 4.7 accrochages par kilomètre. Ce chiffre suppose toutefois aucune adaptation de l'utilisateur au système. Il demeure aussi positif dans la mesure où l'utilisateur aurait subi 1530 accrochages sans le SNSA (en se référant au tableau 10.5). En pratique, l'utilisateur pourrait diminuer l'occurrence de collisions en évitant les manoeuvres près des surfaces non détectées et en améliorant son utilisation globale du système. Un prototype commercial serait également plus robuste aux impacts, évitant les accrochages et les dysfonctionnements dus au déplacement des télémètres laser.

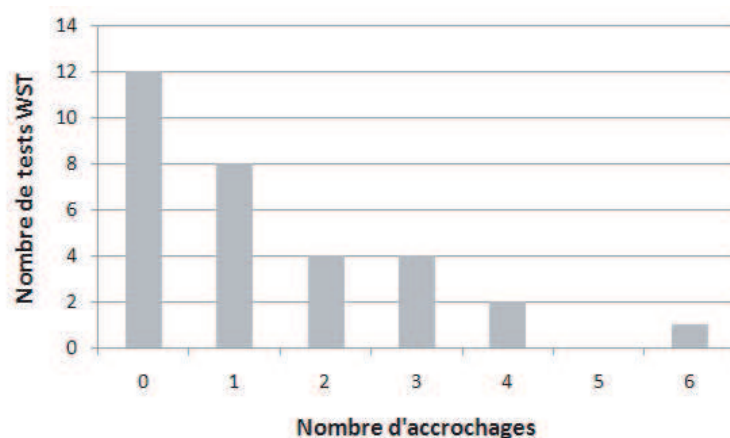


Figure 10.9 Quantité de tests comportant chaque nombre d'accrochages.

Manoeuvres évoluées

Le tableau 10.6 présente des statistiques sur les fonctionnalités d'assistance, comprenant le nombre de fois qu'elles ont été initiées, annulées, leur durée moyenne d'utilisation, les vitesses moyennes employées et la distance minimale moyenne avec les obstacles¹⁵. Les résultats précis pour chaque usager sont fournis en annexe du tableau D.9 au tableau D.14.

Les statistiques des manoeuvres évoluées de traverse de passage et de stationnement, appliquées aux tâches spécifiques de passage de porte et de stationnement du WST, sont résumées au tableau 10.7 et détaillées en annexe au tableau D.15 et D.16. De manière globale, le taux de succès de la manoeuvre de passage de porte est de 82.9% et celui du stationnement est de 95.5%.

En moyenne, la manoeuvre de stationnement apparaît comme étant la plus critique pour la proximité avec les obstacles (avec une proximité minimale moyenne de 18 cm). Remarquons néanmoins que la manoeuvre de traversée de passages a couramment été utilisée dans les couloirs, ce qui augmente sa proximité moyenne par rapport aux cas où elle est utilisée pour les passages de portes. Lors des passages de porte, la proximité moyenne devrait effectivement être inférieure à 18 cm (la valeur de l'espace libre).

Comme il est mentionné plus haut, les accrochages et les dysfonctionnements sont principalement dus au déplacement des télémètres laser. Les contacts sont typiquement rencontrés au niveau des roues arrière dans la zone morte des télémètres, avec le portique pour le passage de porte et le mur pour le stationnement. Pour le stationnement, une légère imprécision au niveau du contrôle dynamique faisait parfois en sorte qu'un télémètre effleure le mur. Étant donné la nature des échecs,

¹⁵Rappelons que les commandes du tableau 10.6 sont employées en des situations variées. La commande de traversée de passages était, par exemple, employée pour suivre les couloirs et celle du stationnement pour s'approcher d'objets latéraux quelconques. Le nombre de fois qu'elles ont été appelées est donc supérieur au nombre de tâches spécifiques de passage de porte et de stationnement du WST.

Tableau 10.6 Statistiques sur l'emploi des fonctionnalités d'assistance.

| | Nombre d'utilisations | Nombre d'annulations | Pourcentage d'annulations | Durée moyenne | Vitesse linéaire moyenne | Vitesse angulaire moyenne | Proximité minimale moyenne des obstacles |
|--------------------------|-----------------------|----------------------|---------------------------|---------------|--------------------------|---------------------------|--|
| Fonction | # | # | % | sec | m/s | rad/s | cm |
| Contrôle continu assisté | 315 | - | - | 52 | 0.19 | 0.14 | 38 |
| Pivotements | 1094 | 140 | 13 | 14 | 0.05 | 0.13 | 43 |
| Mouvements rectilignes | 1051 | 24 | 2 | 11 | 0.26 | 0.05 | 37 |
| Suivi de murs | 418 | 18 | 4 | 16 | 0.31 | 0.07 | 27 |
| Traversée de passages | 231 | 19 | 8.3 | 21 | 0.33 | 0.07 | 28 |
| Stationnement | 194 | 83 | 43 | 37 | 0.16 | 0.07 | 18 |
| Suivi d'une personne | 48 | 14 | 29 | 43 | 0.16 | 0.10 | 27 |

ces taux de succès pourraient évidemment augmenter en améliorant l'exécution (contrôle dynamique) et, surtout, la détection des obstacles.

Le seul¹⁶ système de navigation semi-autonome (Levine *et al.*, 1999) ayant démontré une aptitude à traverser une porte aussi étroite en contexte réel d'opération suppose que l'utilisateur contribue à la manoeuvre à l'aide d'une manette. Le taux de succès est alors de 70% pour 30 essais. En mode automatique, leur système ne parvient plus à passer une seule fois au travers une porte aussi étroite. Levine *et al.* (1999) explique que cet échec en mode automatique s'explique par l'approche d'évitement d'obstacle utilisée, basée sur les champs de force, qui, conceptuellement, *pousse* la plate-forme en dehors du portique. Dans notre cas, ce problème de compétitivité est évité par notre approche d'évitement de collision qui tient compte des objectifs de la manoeuvre, comme nous l'avons détaillé dans le chapitre 4. Grâce à l'interaction des méthodes développées dans ce travail (génération du mouvement, réaction aux obstacles et stratégie de passage), notre SNSA apparaît ainsi comme étant le premier à fournir à un FRM commercial l'aptitude à traverser automatiquement et avec fiabilité une porte standard réelle.

Les usagers démontrèrent une satisfaction et de l'intérêt envers les manoeuvres évoluées. M. Honoré affirme :

Dans l'ensemble, les sujets ont trouvé que le FRMI [Fauteuil roulant motorisé intel-

¹⁶Montesano *et al.* (2010) affirment que leur système peut traverser une porte en conditions similaires, mais seulement trois tests ont été réalisés en ces conditions et leur succès n'a pas été indiqué.

Tableau 10.7 Fiabilité et sécurité des tâches évoluées.

| Tâche | Effectifs | Effleurements | Accrochages | Dysfonctionnements | Échecs habilité | Échecs sécurité | Fiabilité habilité (%) | Fiabilité sécurité (%) | Fiabilité globale (%) |
|---------------------|-----------|---------------|-------------|--------------------|-----------------|-----------------|------------------------|------------------------|-----------------------|
| Traverse de passage | 76 | 0 | 5 | 9 | 8 | 5 | 89.5 | 93.4 | 82.9 |
| Stationnement | 66 | 6 | 1 | 3 | 3 | 0 | 95.5 | 100.0 | 95.5 |

ligent] exécutait très bien les différentes tâches autonomes (stationnement, évitement d'obstacle, suivi de mur, passage de porte, rouler sur le gravier, reculer, rouler dans le corridor et suivi d'une personne). Le stationnement, le suivi de personne et le passage de porte étaient les fonctionnalités les plus impressionnantes.

10.3 Conclusion

Les expérimentations réalisées au centre Lucie-Bruneau ont démontré que le SNSA pourrait être utilisé pour assister les déplacements quotidiens d'un usager de FRM. La facilité d'utilisation et la robustesse des fonctionnalités de navigation autonome aux environnements dynamiques à priori inconnus ont également été démontrées et appréciées par les usagers. Les résultats suggèrent néanmoins qu'il serait important d'améliorer la robustesse du système de détection d'obstacles et de poursuivre l'élaboration d'interfaces de commandes pouvant s'adapter plus facilement aux besoins et aux habilités particulières des usagers.

CHAPITRE 11

CONCLUSION

11.1 Synthèse des travaux

Ce mémoire a introduit un système de navigation semi-autonome pour fauteuil roulant motorisé ainsi que plusieurs approches visant à résoudre divers problèmes liés à la robotique mobile.

Des expérimentations rigoureuses ont démontré la capacité du système de navigation à assister convenablement des usagers de FRM dans leurs déplacements quotidiens. Nous avons montré que le système se démarque par sa facilité d'appropriation par les usagers, par sa capacité à opérer en conditions diversifiées, inconnues et très encombrées et par les mouvements rapides et sécuritaires générés, comparables à ceux observés chez des pilotes sains. Avec ces habilités, ce système s'avère le premier ayant présenté une capacité à réaliser avec fiabilité des passages automatiques de portes de largeur standard et des stationnements automatiques.

Les caractéristiques distinctives du système ont néanmoins nécessité une révision approfondie des théories à la base de la navigation automatique d'une plate-forme mobile. Cette investigation a conduit à des contributions au niveau de la génération du mouvement, de la réaction aux obstacles, de l'architecture de contrôle, des stratégies à la base des manoeuvres évoluées et de l'autolocalisation de la plate-forme.

L'approche de conception habituelle des lois de commande responsables de la génération du mouvement comporte plusieurs lacunes qui affectent l'efficacité des mouvements, leur prévisibilité et la facilité avec laquelle on peut les prédéterminer. Ces lacunes s'observent au niveau de la détermination des vitesses de référence, de la trajectoire du mouvement, de l'anticipation des mouvements futurs et de la compensation de l'erreur de contrôle. Dans notre cas, les caractéristiques des mouvements désirés sont à la base de la génération des lois de commandes et sont, par conséquent, facilement respectées. De cette façon, la deuxième contribution réside dans l'apport d'une approche de *suivi de séquence de points* produisant des mouvements efficaces, faciles à prévoir et à prédéterminer - comme il a été observé dans l'ensemble des fonctionnalités du SNSA.

De manière courante, la réaction aux obstacles varie en fonction de leurs configurations et d'expériences antérieures, mais très peu selon la manoeuvre en cours d'exécution. Il en résulte un problème bien connu de compétitivité entre les mouvements relatifs à la manoeuvre et ceux relatifs à la réaction aux obstacles. En raison de ce problème et d'une considération approximative du périmètre de la plate-forme, aucun fauteuil roulant semi-autonome n'a apparemment démontré à ce jour une réelle aptitude à naviguer en environnement très encombré (comme lors d'un passage

d'une porte standard). Pour résoudre ce problème, nous avons proposé un *assistant stratégique* qui considère, en premier lieu, la trajectoire du périmètre de la plate-forme en tenant compte de l'incertitude liée à son évolution. Ceci permet d'inhiber les vitesses de déplacement afin de garantir la sécurité du mouvement de la manoeuvre. En second lieu, lorsque la direction du mouvement de la manoeuvre n'est plus possible en raison de la proximité des obstacles, l'assistant propose une stratégie alternative en tenant compte de ses objectifs, de ses priorités et de sa stratégie (offrant une fonctionnalité de *déblocage*). Ceci permet de minimiser les réactions *compétitrices* au profit de réactions *cohérentes* à la manoeuvre. Ce nouvel assistant stratégique a démontré sa capacité à assister convenablement les usagers (au premier niveau d'autonomie) et l'ensemble des manoeuvres offertes par le système de navigation (au deuxième niveau d'autonomie). La capacité du système de navigation à opérer en lieux dynamiques et restreints lui est, en très grande partie, attribuable.

Ce travail contribue quatrièmement pour l'apport d'une architecture de contrôle qui concentre le travail d'interprétation des mesures dans une *représentation de la réalité utile* à la base du développement des processus décisionnels. Cette architecture a permis de tester facilement les fonctionnalités de la simulation à la réalité et d'une plate-forme à l'autre. Elle nous a permis de réaliser et d'intégrer rapidement des fonctionnalités évoluées, tels que le suivi de personnes¹. En coordonnant efficacement l'ensemble des fonctionnalités du système de navigation, elle a supporté la réactivité du système et a ainsi contribué à ses aptitudes à naviguer en lieux encombrés.

La cinquième contribution porte sur la réalisation d'une méthode de traversée de passage étroit, un défi dont la complexité est bien reconnue, quoique normalement amplifiée par le problème de réaction aux obstacles discutés plus haut. Notre approche se distingue par sa capacité à traverser des passages variés et pour son adaptativité aux erreurs de contrôle et à l'évolution de l'environnement local. Cette méthode a démontré son efficacité en permettant un taux de succès de 82.9 % sur 76 essais pour la traversée d'une porte standard lors des tests sur le fauteuil roulant semi-autonome. Comme il a été discuté dans la partie expérimentale, il s'agit de la première approche permettant à un FRM commercial de traverser de manière automatique (sans intervention du pilote en cours de manoeuvre) des portes de largeur standard (90 cm).

Comme sixième contribution, une méthode de stationnement automatique a été développée. Cette méthode a démontré une capacité exceptionnelle à opérer en conditions variées et contraintes². Son taux de succès également élevé (94.0% sur 67 essais) combiné à la forte appréciation des usagers révèle sa pertinence.

Comme septième et dernière contribution, nous avons proposé une méthode d'autolocalisation d'une plate-forme mobile dans un environnement partiellement connu à partir de données télé-

¹Le suivi de personne a été réalisé (codé et testé) en deux après-midi, ce qui aurait été impossible sans la facilité de réutilisation que permet l'architecture.

²Elle a été utilisée le long des murs, dans le cubicule du parcours du WST, dans les ascenseurs, dans les espaces de rangement, près du lit d'un cabinet de médecin...

métriques. Sa fiabilité repose sur la prise en considération, dans un modèle d'observation, des disparités entre l'environnement détecté et l'environnement connu (au niveau de la mise en correspondance et de la confiance vis-à-vis la pose évaluée). La robustesse de cette approche a été, pour l'instant, validée sur une plate-forme de recherche. Elle pourrait être introduite au SNSA du fauteuil roulant semi-autonome lorsqu'un troisième niveau d'autonomie sera mis en opération.

11.2 Limitations de la solution proposée

La capacité à percevoir les obstacles tant positifs que négatifs est une contrainte importante du système de navigation. En effet, l'erreur de détection des obstacles s'avère de loin la première cause des collisions observées (la deuxième cause étant l'erreur de contrôle dynamique). Le nombre d'accrochages pourrait diminuer drastiquement en améliorant la capacité à percevoir les zones navigables et non navigables de l'environnement, par exemple en utilisant des caméras. Le taux de succès des manoeuvres évoluées augmenterait conséquemment.

Le troisième niveau d'autonomie n'a pas encore été testé sur le fauteuil roulant³. Ce mode permettrait des commandes personnalisées comme *rend toi au lavabo*, *rend toi près de la table*, etc. Toutefois, une surabondance de commandes personnalisées de ce type peut complexifier l'utilisation et le support du système, tandis qu'une faible quantité peut diminuer sa portée. Il serait donc encore intéressant de définir des commandes générales indépendantes de l'environnement précis de chaque usager, comme nous l'avons fait au deuxième niveau d'autonomie.

Les manoeuvres du système de navigation semi-autonome sont surtout utiles en environnement intérieur, mais pourraient s'avérer insuffisantes pour la navigation extérieure. Des commandes comme *suivre le trottoir*, *traverser la rue*, *suivre une ligne sur le sol* ou d'autres pourraient possiblement être pertinentes dans ce cas.

³Une technique de planification de chemin en environnement partiellement connu devrait être envisagée lors de l'ajout de cette fonction.

RÉFÉRENCES

- ALAMI, R., CHATILA, R., FLEURY, S., GHALLAB, M. et INGRAND, F. (1998). An architecture for autonomy. *The International Journal of Robotics Research*, 17, 315.
- ALBUS, J. et RIPPEY, W. (2002). Rcs : A reference model architecture for intelligent control. *From Perception to Action Conference, 1994., Proceedings*. IEEE, 218–229.
- AMATO, N. M., BAYAZIT, O. B. et DALE, L. K. (1998). Obprm : An obstacle-based prm for 3d workspaces.
- AN, D. et WANG, H. (2004). Vph : a new laser radar based obstacle avoidance method for intelligent mobile robots. *Intelligent Control and Automation, 2004. WCICA 2004. Fifth World Congress on*. vol. 5, 4681–4685.
- ANDERSON, T. et DONATH, M. (1990). Autonomous robots and emergent behavior : a set of primitive behaviors for mobile robot control. *Proceedings. IROS '90. IEEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems '90. Towards a New Frontier of Applications (Cat. No.90TH0332-7)*, 723 – 30.
- ANGUELOV, D., KOLLER, D., PARKER, E. et THRUN, S. (2004). Detecting and modeling doors with mobile robots. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Citeseer, vol. 4, 3777–3784.
- ARAKAWA, A., HIYAMA, M., EMURA, T. et KAGAMI, Y. (1995). Trajectory generation for wheeled mobile robot based on landmarks. *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 1995. Intelligent Systems for the 21st Century*. vol. 2.
- ARGYROS, A., GEORGIADIS, P., TRAHANIAS, P. et TSAKIRIS, D. (2002). Semi-autonomous navigation of a robotic wheelchair. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 34, 315–329.
- ARKIN, R. (1987). Motor schema-based mobile robot navigation. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 264–271.
- ARKIN, R. (1989). Towards the unification of navigational planning and reactive control. Rapport technique, Georgia Institute of Technology.
- ARUN, K., HUANG, T. et BLOSTEIN, S. (Sept. 1987). Least-squares fitting of two 3-d point sets [computer vision]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, PAMI-9, 698 – 700.
- ATRASH, A., KAPLOW, R., VILLEMURE, J., WEST, R., YAMANI, H. et PINEAU, J. (2009). Development and validation of a robust interface for improved human-robot interaction. *International Journal of Social Robotics*, 1, 345 – 356.

- AURENHAMMER, F. (1991). Voronoi diagrams- a survey of a fundamental geometric data structure. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 23, 405.
- BARRAQUAND, J. et LATOMBE, J. (1989). On nonholonomic mobile robots and optimal maneuvering. *IEEE International Symposium on Intelligent Control, 1989. Proceedings.* 340–347.
- BATURONE, I., MORENO-VELO, F., SANCHEZ-SOLANO, S. et OLLERO, A. (2004). Automatic design of fuzzy controllers for car-like autonomous robots. *IEEE transactions on Fuzzy Systems*, 12, 447–465.
- BELK, R. (1988). Possessions and the extended self. *Journal of Consumer research*, 15, 139.
- BONASSO, R., FIRBY, R., GAT, E., KORTENKAMP, D., MILLER, D. et SLACK, M. (1997). Experiences with an architecture for intelligent, reactive agents. *Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence*, 9, 237–256.
- BONCI, A., LONGHI, S., MONTERIU, A. et VACCARINI, M. (2005). Navigation system for a smart wheelchair. *Journal of Zhejiang University : Science*, 6 A, 110 – 117.
- BOOR, V., OVERMARS, M. H. et VAN DER STAPPEN, A. (1999). Gaussian sampling strategy for probabilistic roadmap planners. *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2, 1018 – 1023.
- BORENSTEIN, J. et KOREN, Y. (1990). Real-time obstacle avoidance for fast mobile robots in cluttered environments. *IEEE Conference of Robotics and Automation*. Citeseer, 572–577.
- BORENSTEIN, J. et KOREN, Y. (1991). The vector field histogram–fast obstacle avoidance for mobile robots. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 7, 278–288.
- BORGOLTE, U., HOYER, H., BÜHLER, C., H., H. et R., H. (1998). Architectural concepts of a semi-autonomous wheelchair. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 22, 233 – 253.
- BOUCHER, P., KELOUWANI, S. et COHEN, P. (2009). Mobile platform self-localization in partially unknown dynamic environments. *ICINCO 2009- 6th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics*.
- BOURHIS, G. et AGOSTINI, Y. (1998). The vahm robotized wheelchair : system architecture and human-machine interaction. *Journal of Intelligent and Robotic systems*, 22, 39–50.
- BROOKS, R. (1987). A hardware retargetable distributed layered architecture for mobile robot control. *Robotics and Automation. Proceedings. 1987 IEEE International Conference on.* vol. 4, 106–110.
- BRUEMMER, D., FEW, D., BORING, R., MARBLE, J., WALTON, M. et NIELSEN, C. (2005). Shared understanding for collaborative control. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern. A, Syst. Humans (USA)*, 35, 494 – 504.

- BRUNEL, O., GALLEN, C. et ROUX, D. (2009). Le rôle de l'appropriation dans l'expérience de consommation alimentaire. une analyse de blogs.
- BRYSON, A. et HO, Y. (1975). *Applied optimal control : optimization, estimation, and control*. Taylor & Francis.
- CARLSON, J., THORPE, C. et DUKE, D. L. (2008). Robust real-time local laser scanner registration with uncertainty estimation. *Springer Tracts in Advanced Robotics*, 42, 349 – 357.
- CENSI, A., IOCCHI, L. et GRISETTI, G. (2005). Scan matching in the hough domain. *Robotics and Automation, 2005. ICRA 2005. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on*. 2739–2744.
- CHANEY, D., CERMAB-LEG, L. et DE DIJON, I. (2007). Le concept d'appropriation : Une application au domaine de la musique enregistrée. *Actes des 6èmes Journées Normandes de la Consommation, Rouen, Mars*.
- CHERUBINI, A., ORIOLO, G., MACRÍ, F., ALOISE, F., CINCOTTI, F. et MATTIA, D. (2008). A multimode navigation system for an assistive robotics project. *Autonomous Robots*, 25, 383–404.
- CHWA, D. (2004/07/). Sliding-mode tracking control of nonholonomic wheeled mobile robots in polar coordinates. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 12, 637 – 44.
- CICIRELLI, G., DORAZIO, T. et DISTANTE, A. (2003). Target recognition by components for mobile robot navigation. *Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence*, 15, 281–297.
- CORTES, U., URDIALES, C., ANNICCHIARICO, R., BARRUE, C., MARTINEZ, A. et CALTAGIRONE, C. (2007). Assistive wheelchair navigation : A cognitive view. *Intelligence (SCI)*, 48, 165–187.
- CORTÉSA, U., ANNICCHIARICO, R., VÁZQUEZ-SALCEDAA, J., URDIALESC, C., CAÑAMEROD, L., LÓPEZE, M., SÀNCHEZ-MARRÈA, M. et CALTAGIRONE, C. (2003). Assistive technologies for the disabled and for the new generation of senior citizens : the e-tools architecture. *AI Communications*, 16, 193–207.
- COX, B. et NOVOBILSKI, A. (1987). *Object-oriented programming : an evolutionary approach*. Addison-Wesley Reading, MA.
- CROWLEY, J. (2002). Navigation for an intelligent mobile robot. *Robotics and Automation, IEEE Journal of*, 1, 31–41.
- DE LAET, T., DE SCHUTTER, J. et BRUYNINCKX, H. (2008). A Rigorously Bayesian Beam Model and an Adaptive Full Scan Model for Range Finders in Dynamic Environments. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 33, 179–222.

- DEMEESTER, E., NUTTIN, M., VANHOOYDONCK, D. et VAN BRUSSEL, H. (2003). A model-based, probabilistic framework for plan recognition in shared wheelchair control : experiments and evaluation. *Intelligent Robots and Systems, 2003. (IROS 2003). Proceedings. 2003 IEEE/RSJ International Conference on.* vol. 2, 1456–1461 vol.2.
- DEMIRLI, K. et KHOSHNEJAD, M. (2009). Autonomous parallel parking of a car-like mobile robot by a neuro-fuzzy sensor-based controller. *Fuzzy Sets and Systems*, 160, 2876 – 2891.
- DUBINS, L. (1957). On curves of minimal length with a constraint on average curvature, and with prescribed initial and terminal positions and tangents. *American Journal of Mathematics*, 497–516.
- EBERST, C., ANDERSSON, M. et CHRISTENSEN, H. (2000). Vision-based door-traversal for autonomous mobile robots. *Proceedings of the 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*.
- EGERSTEDT, M., HU, X. et STOTSKY, A. (2001). Control of mobile platforms using a virtual vehicle approach. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 46, 1777–1782.
- FABRIZI, E., ORIOLO, G., PANZIERI, S. et ULIVI, G. (1998). Enhanced uncertainty modeling for robot localization. *7th Int. Symp. on Robotics with Applications (ISORA'98)*. 313–320.
- FERBACH, P. (1998). A method of progressive constraints for nonholonomic motion planning. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 14, 172–179.
- FERNANDEZ-CARMONA, M., FERNANDEZ-ESPEJO, B., PEULA, J., URDIALES, C. et SANDOVAL, F. (2009). Efficiency based collaborative control modulated by biometrics for wheelchair assisted navigation. *Rehabilitation Robotics, 2009. ICORR 2009. IEEE International Conference on.* 737–742.
- FIGLIOTTI, S., LEO, T. et LONGHI, S. (2000). A navigation system for increasing the autonomy and the security of powered wheelchairs. *IEEE Transactions on rehabilitation engineering*, 8, 490–498.
- FLEURY, S., SOUERES, P., LAUMOND, J. et CHATILA, R. (1995). Primitives for smoothing mobile robot trajectories. *IEEE transactions on robotics and automation*, 11, 441–448.
- FOX, D., BURGARD, W. et THRUN, S. (1997). The dynamic window approach to collision avoidance. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 4, 23–33.
- GAT, E. ET AL. (1997). On three-layer architectures. *Artificial intelligence and mobile robots*.
- GE, S. et CUI, Y. (2000). New potential functions for mobile robot path planning. *IEEE Transactions on robotics and automation*, 16, 615–620.
- GOODRICH, M. A., OLSEN, D. R., CR, J. W. et PALMER, T. J. (2001). Experiments in adjustable autonomy. *Proceedings of IJCAI Workshop on Autonomy, Delegation and Control : Interacting with Intelligent Agents*. 1624–1629.

- GOODRIDGE, S., KAY, M. et LUO, R. (1996). Multilayered fuzzy behavior fusion for real-time reactive control of systems with multiple sensors. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 43, 387–394.
- GULATI, S. et KUIPERS, B. (2008). High performance control for graceful motion of an intelligent wheelchair. *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 3932 – 3938.
- HO, J., YANG, M.-H., RANGARAJAN, A. et VEMURI, B. (2007). A new affine registration algorithm for matching 2d point sets. *Proceedings - IEEE Workshop on Applications of Computer Vision, WACV 2007*.
- HORIGUCHI, Y. et SAWARAGI, T. (2005). Effects of probing behaviors to adapt machine autonomy in shared control systems. Piscataway, NJ, USA, vol. Vol. 1, 317 – 23.
- HORN, B. (1987). Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternions. *Journal of the Optical Society of America A (Optics and Image Science)*, 4, 629 – 42.
- HORN, O. et KREUTNER, M. (2009). Smart wheelchair perception using odometry, ultrasound sensors, and camera. *Robotica*, 27, 303 – 310.
- HSU, D., JIANG, T., REIF, J. et SUN, Z. (2003). The bridge test for sampling narrow passages with probabilistic roadmap planners. *Robotics and Automation, 2003. Proceedings. ICRA '03. IEEE International Conference on*, 3, 4420 – 4426 vol.3.
- HSU, D., KAVRAKI, L. E., LATOMBE, J.-C., MOTWANI, R. et SORKIN, S. (1998). On finding narrow passages with probabilistic roadmap planners.
- HU, H. et BRADY, M. (1996). A parallel processing architecture for sensor-based control of intelligent mobile robots. *Robotics and Autonomous Systems*, 17, 235–257.
- HUANG, H.-C. et TSAI, C.-C. (2009). Simultaneous tracking and stabilization of an omnidirectional mobile robot in polar coordinates : A unified control approach. *Robotica*, 27, 447 – 458.
- HUI, N. et PRATIHAR, D. (2008). Soft computing-based navigation schemes for a real wheeled robot moving among static obstacles. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 51, 333–368.
- IGLESIAS, R., KYRIACOU, T., NEHMZOW, U. et BILLINGS, S. (2007). Task identification and characterisation in mobile robotics through non-linear modelling. *Robotics and Autonomous Systems*, 55, 267–275.
- IRIE, M., NAGATANI, K. et GOFUKU, A. (2003). Path evaluation for a mobile robot based on a risk of collision. *Computational Intelligence in Robotics and Automation, 2003. Proceedings. 2003 IEEE International Symposium on*, 1, 485 – 490 vol.1.

- ISHIKAWA, S. (1991). A method of indoor mobile robot navigation by using fuzzy control. *IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems' 91. Intelligence for Mechanical Systems, Proceedings IROS'91*. 1013–1018.
- JIANG, K. et SENEVIRATNE, L. (1999). A sensor guided autonomous parking system for nonholonomic mobile robots. *1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1999. Proceedings*. vol. 1.
- KANAYAMA, Y. et HARTMAN, B. (1997). Smooth local-path planning for autonomous vehicles. *The International Journal of Robotics Research*, 16, 263.
- KASPER, M., FRICKE, G., STEUERNAGEL, K. et VON PUTTKAMER, E. (2001). A behavior-based mobile robot architecture for learning from demonstration. *Robotics and Autonomous Systems*, 34, 153 – 164.
- KAVRAKI, L., SVESTKA, P., LATOMBE, J.-C. et OVERMARS, M. (1996). Probabilistic roadmaps for path planning in high-dimensional configuration spaces. *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, 12, 566 –580.
- KHATIB, O. (1985). Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots. *Robotics and Automation. Proceedings. 1985 IEEE International Conference on*, 2, 500 – 505.
- KIM, D. et NEVATIA, R. (1998). Recognition and localization of generic objects for indoor navigation using functionality. *Image and Vision Computing*, 16, 729 – 743.
- KIM, Y. et MINOR, M. (2007). Path manifold-based kinematic control of wheeled mobile robots considering physical constraints. *The International Journal of Robotics Research*, 26, 955.
- KITAGAWA, L., KOBAYASHI, T., BEPPU, T. et TERASHIMA, K. (2001). Semi-autonomous obstacle avoidance of omnidirectional wheelchair by joystick impedance control. *2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2001. Proceedings*. vol. 4.
- KUNCHEV, V., JAIN, L., IVANCEVIC, V. et FINN, A. (2006). Path Planning and Obstacle Avoidance for Autonomous Mobile Robots : A Review. *Lecture Notes in Computer Science*, 4252, 537.
- LAMIRAUX, F. et LAMMOND, J. (2001). Smooth motion planning for car-like vehicles. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 17, 498–501.
- LATOMBE, J. (1991). A fast path planner for a car-like indoor mobile robot. *Proceedings of the Ninth National Conference on Artificial Intelligence*. 659–665.
- LATOMBE, J.-C., LAZANAS, A. et SHEKHAR, S. (1991). Robot motion planning with uncertainty in control and sensing. *Artificial Intelligence*, 52, 1 – 47.
- LAUMOND, J., JACOBS, P., TAIX, M. et MURRAY, R. (1994). A motion planner for nonholonomic mobile robots. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 10, 577–593.

- LAVALLE, S. (2006). *Planning algorithms*. Cambridge Univ Pr.
- LEE, C., LIN, C. et SHIU, B. (2009). Autonomous vehicle parking using hybrid artificial intelligent approach. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 1–25.
- LEVINE, S., BELL, D., JAROS, L., SIMPSON, R., KOREN, Y. et BORENSTEIN, J. (1999). The navchair assistive wheelchair navigation system. *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering*, 7, 443 – 451.
- MACEK, K., PETROVIC, I. et SIEGWART, R. (2005). A control method for stable and smooth path following of mobile robots. *Proceedings of the European Conference on Mobile Robots*.
- MAHADEVAN, S. et CONNELL, J. (1992). Automatic programming of behavior-based robots using reinforcement learning. *Artificial intelligence*, 55, 311–365.
- MAKARENKO, A., BROOKS, A. et KAUPP, T. (2007). On the benefits of making robotic software frameworks thin. *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, (San Diego, California).
- MANDEL, C., HUEBNER, K. et VIERHUFF, T. (2005). Towards an autonomous wheelchair : Cognitive aspects in service robotics. *Proceedings of Towards Autonomous Robotic Systems (TAROS 2005)*. Citeseer, 165–172.
- MANUAL-WSTP4.1 (2008). Wheelchair skills program (wsp) version 4.1, wheelchair skills test (wst) manual.
- MATARIC, M. (1997). Behaviour-based control : Examples from navigation, learning, and group behaviour. *Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence*, 9, 323–336.
- MAZO, M., GARCIA, J., RODRIGUEZ, F., URENA, J., LAZARO, J. et ESPINOSA, F. (2000). Integral system for assisted mobility. *Information sciences*, 129, 1 – 15.
- MINGUEZ, J. et MONTANO, L. (2005). Sensor-based robot motion generation in unknown, dynamic and troublesome scenarios. *Robotics and Autonomous Systems*, 52, 290 – 311.
- MINGUEZ, J., MONTANO, L. et SANTOS-VICTOR, J. (2006). Abstracting vehicle shape and kinematic constraints from obstacle avoidance methods. *Autonomous Robots*, 20, 43–59.
- MONASTERIO, I., LAZKANO, E., RANO, I. et SIERRA, B. (2002). Learning to traverse doors using visual information. *Mathematics and Computers in Simulation*, 60, 347–356.
- MONTESANO, L., DIAZ, M., BHASKAR, S. et MINGUEZ, J. (2010). Towards an intelligent wheelchair system for users with cerebral palsy. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 18, 193 – 202.
- MOTLAGH, O. R. E., HONG, T. S. et ISMAIL, N. (2009). Development of a new minimum avoidance system for a behavior-based mobile robot. *Fuzzy Sets and Systems*, 160, 1929 – 1946.
- Theme : Information Processing and Applications.

- MUNOZ, V., OLLERO, A., PRADO, M. et SIMON, A. (1994). Mobile robot trajectory planning with dynamic and kinematic constraints. *1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1994. Proceedings.* 2802–2807.
- MUÑOZ-SALINAS, R., AGUIRRE, E. et GARCÍA-SILVENTE, M. (2006). Detection of doors using a genetic visual fuzzy system for mobile robots. *Autonomous Robots*, 21, 123–141.
- NAGATANI, K. et YUTA, S.-I. (1993). Path and sensing point planning for mobile robot navigation to minimize the risk of collision. *Intelligent Robots and Systems '93, IROS '93. Proceedings of the 1993 IEEE/RSJ International Conference on*, 3, 2198 –2203 vol.3.
- NELSON, W. (1989). Continuous-curvature paths for autonomous vehicles. *1989 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1989. Proceedings.* 1260–1264.
- NORMEY-RICO, J., ALCALA, I., GOMEZ-ORTEGA, J. et CAMACHO, E. (2001). Mobile robot path tracking using a robust pid controller. *Control Engineering Practice*, 9, 1209 – 1214.
- PARASURAMAN, R., SHERIDAN, T. et WICKENS, C. (2000). A model for types and levels of human interaction with automation. *Systems, Man and Cybernetics, Part A : Systems and Humans, IEEE Transactions on*, 30, 286 –297.
- PARASURAMAN, S., GANAPATHY, V. et SHIRINZADEH, B. (2005). Behavior based mobile robot navigation technique using ai system : Experimental investigations. *ICGST ARAS*, 5, 31–37.
- PARK, B. S., YOO, S. J., PARK, J. B. et CHOI, Y. H. (2009). Adaptive neural sliding mode control of nonholonomic wheeled mobile robots with model uncertainty. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 17, 207 – 214.
- PAROMTCHIK, I., LAUGIER, C. et IMAG, G. (1996). Motion generation and control for parking an autonomous vehicle. *1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1996. Proceedings.* vol. 4.
- PAYTON, D. W. (1986). Architecture for reflexive autonomous vehicle control. *Robotics and Automation. Proceedings. 1986 IEEE International Conference on*, 3, 1838 – 1845.
- PEPY, R. et LAMBERT, A. (2006). Safe path planning in an uncertain-configuration space using rrt. *2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems.* 5376–5381.
- PRASSLER, E., SCHOLZ, J. et FIORINI, P. (1999). Navigating a robotic wheelchair in a railway station during rush hour. *International Journal of Robotics Research*, 18, 711 – 727.
- PROHANSKY, H., ITTELSON, W. et RIVLIN, L. (1970). Environmental psychology - man and his physical setting.
- RAFFO, G., GOMES, G., NORMEY-RICO, J., KELBER, C. et BECKER, L. (2009). A predictive controller for autonomous vehicle path tracking. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 10, 92 – 102.

- REBSAMEN, B., BURDET, E., GUAN, C., ZHANG, H., TEO, C. L., ZENG, Q., LAUGIER, C. et JR., M. H. A. (2007). Controlling a wheelchair indoors using thought. *IEEE Intelligent Systems*, 22, 18–24.
- REIGNIER, P., HANSEN, V. et CROWLEV, J. (1995). Incremental supervised learning for mobile robot reactive control. *Intelligent autonomous systems : IAS-4 : proceedings of the International Conference Karlsruhe, Germany March 27-30, 1995*. IOS Press, 287.
- ROFER, T. et LANKENAU, A. (2000). Architecture and applications of the bremen autonomous wheelchair. *Information sciences*, 126, 1 – 20.
- SAAQ (2006). *Conduire un véhicule de promenade*. Société de l'assurance automobile du Québec- SAAQ Les Publications du Québec.
- SAFFIOTTI, A., KONOLIGE, K. et RUSPINI, E. (1995). A multivalued logic approach to integrating planning and control. *Artificial Intelligence*, 76, 481–526.
- SAOTTI, A. (1997). Fuzzy logic in autonomous robotics : behavior coordination. *Proc. of the 6th IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems*. vol. 1, 573–578.
- SCAGLIA, G. J., MUT, V. A., JORDAN, M., CALVO, C. et QUINTERO, L. (2009). Robust-control-based controller design for a mobile robot. *Journal of Engineering Mathematics*, 63, 17 – 32.
- SCHMIDT, S. F. (1970). Computational techniques in kalman filtering. *NATO Advisory Group for Aerospace Research and Development*.
- SGOUROS, N. (2002). Qualitative navigation for autonomous wheelchair robots in indoor environments. *Autonomous Robots*, 12, 257–266.
- SHAH HAMZEI, G., MULVANEY, D. et SILLITOE, I. (1999). Becoming incrementally reactive : on-line learning of an evolving decision tree array for robot navigation. *Robotica*, 17, 325 – 334.
- SIMMONS, R., GOLDBERG, D., GOODE, A., MONTEMERLO, M., ROY, N., SELLNER, B., URMSON, C., SCHULTZ, A., ABRAMSON, M., ADAMS, W. ET AL. (2003). Grace : An autonomous robot for the aaai robot challenge. *AI magazine*, 24, 51.
- SIMPSON, R. et LEVINE, S. (1997). Adaptive shared control of a smart wheelchair operated by voice control. *Intelligent Robots and Systems, 1997. IROS '97., Proceedings of the 1997 IEEE/RSJ International Conference on*. vol. 2, 622–626 vol.2.
- SIMPSON, R. C. (2005). Smart wheelchairs : A literature review. *Journal of Rehabilitation Research and Development*, 42, 423 – 435.
- SIMPSON, R. C., LOPRESTI, E. F. et COOPER, R. A. (2008). How many people would benefit from a smart wheelchair ? *Journal of Rehabilitation Research and Development*, 45, 53 – 72.

- SONG, K.-T. et SHEEN, L.-H. (2000). Heuristic fuzzy-neuro network and its application to reactive navigation of a mobile robot. *Fuzzy Sets and Systems*, 110, 331 – 340.
- SUN, Z., HSU, D., JIANG, T., KURNIAWATI, H. et REIF, J. (2005). Narrow passage sampling for probabilistic roadmap planning. *Robotics, IEEE Transactions on*, 21, 1105 – 1115.
- THRUN, S., BURGARD, W. et FOX, D. (2005). *Probabilistic Robotics (Intelligent Robotics and Autonomous Agents)*. The MIT Press.
- TRIEU, H. T., NGUYEN, H. T. et WILLEY, K. (2008). Shared control strategies for obstacle avoidance tasks in an intelligent wheelchair. *Engineering in Medicine and Biology Society, 2008. EMBS 2008. 30th Annual International Conference of the IEEE*. 4254–4257.
- TUNSTEL, E., LIPPINCOTT, T. et JAMSHIDI, M. (1997). Behavior hierarchy for autonomous mobile robots : Fuzzy-behavior modulation and evolution. *International Journal of Intelligent Automation and soft computing*, 3, 37–49.
- ULRICH, I. et BORENSTEIN, J. (1998). Vfh+ : Reliable obstacle avoidance for fast mobile robots. *IEEE international conference on robotics and automation*. Citeseer, 1572–1577.
- URDIALES, C., PEULA, J., BARRUE, C., CORTES, U., SANDOVAL, F., CALTAGIRONE, C. et ANNICCHIARICO, R. (2008). An adaptive scheme for wheelchair navigation collaborative control. Arlington, VA, United states, vol. FS-08-02, 134 – 141.
- WALKER, M., SHAO, L. et VOLZ, R. (1991). Estimating 3-d location parameters using dual number quaternions. *CVGIP : Image Understanding*, 54, 358 – 67.
- WANG, H., CHEN, C. et HUANG, Z. (2007a). Ultrasonic sensor based fuzzy-neural control algorithm of obstacle avoidance for mobile robot. *Lecture Notes in Computer Science*, 4491, 824.
- WANG, H., TIAN, X. et HUANG, Z. (2007b). Kinematic analysis, obstacle avoidance and self-localization for a mobile robot. Berlin, Germany, 733 – 42.
- WANG, M. et LIU, J. N. (2008). Fuzzy logic-based real-time robot navigation in unknown environment with dead ends. *Robotics and Autonomous Systems*, 56, 625 – 643.
- WANG, W. et LI, Y. (2009). A multi-rrts framework for robot path planning in high-dimensional configuration space with narrow passages. *Mechatronics and Automation, 2009. ICMA 2009. International Conference on*, 4952 –4957.
- WANG, Y. et CHIRIKJIAN, G. (2000). A new potential field method for robot path planning. *IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2000. Proceedings. ICRA'00*. vol. 2.
- WANG, Y., MULVANEY, D., SILLITOE, I. et SWERE, E. (2008). Robot navigation by way-points. *Journal of Intelligent and Robotic Systems : Theory and Applications*, 52, 175 – 207.

- WEI, P., XU, C. et ZHAO, F. (2005). A method to locate the position of mobile robot using extended kalman filter. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 3801 NAI, 815 – 820.
- YANCO, H. (1998). Wheellesley : A robotic wheelchair system : Indoor navigation and user interface. *Lecture Notes in Computer Science*, 1458, 256–268.
- YANG, X., MOALLEM, M. et PATEL, R. (2006). A sensor-based navigation algorithm for a mobile robot using fuzzy logic. *International Journal of Robotics and Automation*, 21, 140.
- YAVUZ, H. et BRADSHAW, A. (2002). A new conceptual approach to the design of hybrid control architecture for autonomous mobile robots. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 34, 1–26.
- YE, C., YUNG, N. et WANG, D. (2003). A fuzzy controller with supervised learning assisted reinforcement learning algorithm for obstacle avoidance. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B*, 33, 17–27.
- ZALZAL, V., GAVA, R., KELOUWANI, S. et COHEN, P. (2009). Acropolis : A fast prototyping robotic application. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 6.
- ZENG, Q., TEO, C. L., REBSAMEN, B. et BURDET, E. (2006). Design of a collaborative wheelchair with path guidance assistance. *Proceedings. 2006 Conference on International Robotics and Automation (IEEE Cat. No. 06CH37729D)*, 877 – 82.
- ZHANG, Z. (1994). Iterative point matching for registration of free-form curves and surfaces. *International Journal of Computer Vision*, 13, 119 – 152.

ANNEXE A

SUIVI DE SÉQUENCE DE POINTS DE PASSAGE

A.1 Évaluation de la vitesse angulaire

L'objectif est de définir une loi de commande minimisant le temps de compensation de l'écart angulaire, tout en respectant les limites de vitesse ω_{max} et de décélération α_s . Afin de prévenir un dépassement, la vitesse angulaire doit être nulle si l'écart ϕ_k est nul. Pour demeurer toujours réactive, la loi doit être fonction de l'écart et non du temps.

Sous de telles conditions, il apparaît que la vitesse angulaire ω_k^* correspond à ω_{max} lorsque l'écart dépasse un seuil de ϕ_{sdec} et diminue graduellement selon α_s jusqu'à $\phi_k = 0$.

Nous cherchons ci-dessous à exprimer la loi de contrôle en fonction de l'écart angulaire ϕ_k . Pour ce faire, nous considérons d'abord les équations temporelles décrivant la compensation d'un écart angulaire. Le signe de la vitesse angulaire cause la diminution de l'écart angulaire et implique une décélération constante de α_s jusqu'à devenir nulle en $t = 0$. L'orientation vers la cible est donc réalisée pour $t < 0$ avec l'équation suivante, lorsque $|\phi| < \phi_{sdec}$:

$$\omega(t) = -\alpha_s \cdot t \cdot \text{sign}(\phi) \quad (\text{A.1})$$

On obtient l'écart angulaire en intégrant (A.1) :

$$\begin{aligned} \phi(t) &= -\int \omega(t) \delta t \\ &= \frac{\alpha_s \cdot t^2}{2} \text{sign}(\phi). \end{aligned} \quad (\text{A.2})$$

En isolant le temps t dans (A.2) et puisque $t \leq 0$, on obtient :

$$t = -\sqrt{\frac{2|\phi|}{\alpha_s}}. \quad (\text{A.3})$$

Reportant l'équation (A.3) dans (A.1), la loi recherchée de la vitesse angulaire pour un instant k lorsque $|\phi_k| < \phi_{sdec}$ est :

$$\omega_k(\phi_k) = \sqrt{2|\phi_k| \alpha_s} \cdot \text{sign}(\phi_k), \quad (\text{A.4})$$

où l'écart angulaire critique ϕ_{sdec} à partir duquel la décélération débute avec une vitesse ω_{max} est¹ :

$$\phi_{sdec} = \frac{\omega_{max}^2}{2\alpha_s}. \quad (A.5)$$

En somme, la loi de la vitesse angulaire qui respecte l'ensemble des contraintes est :

$$\omega_k^*(\phi_k) = \begin{cases} \sqrt{2|\phi_k|\alpha_s} \cdot \text{sign}(\phi_k) & |\phi_k| < \phi_{sdec} \\ \omega_{max} * \text{sign}(\phi_k), & \text{sinon} \end{cases}. \quad (A.6)$$

A.2 Évaluation de la vitesse linéaire

L'objectif consiste maintenant à trouver une loi de vitesse linéaire réduisant efficacement la distance avec le prochain point de passage, étant donné une vitesse linéaire maximale v_{max} , une décélération maximale a_s et une vitesse v_i sur le prochain point de passage. Notez que $v_i, i \in \{1, \dots, N\}$ représentent les vitesses linéaires sur chaque point de passage assurant la continuité de la commande (leur évaluation est présentée à la section 3.4.5). Pour une bonne réactivité, la loi de commande est aussi indépendante du temps et varie selon l'écart de configuration.

S'il n'y a aucun écart angulaire ($\phi_k = 0$), la vitesse linéaire optimale est v_{max} si la distance de séparation d_k dépasse une distance critique d_{sdec} ; et décroît ensuite selon a_s jusqu'à v_i sur le point de passage w_i (où $d_k = 0$).

Pour que la vitesse v soit égale à v_i à $t = 0$, il faut (lorsque $d < d_{sdec}$) :

$$v(t) = -a_s \cdot t + v_i. \quad (A.7)$$

La distance d avec la cible w_i sera ainsi :

$$\begin{aligned} d(t) &= -\int v(t) dt \\ &= \frac{a_s \cdot t^2}{2} - v_i t \end{aligned} \quad (A.8)$$

En isolant le temps t dans l'expression (A.7), on a :

$$t(v) = \frac{v_i - v}{a_s} \quad (A.9)$$

que l'on peut substituer dans (A.8) pour avoir la vitesse v en fonction de la distance d :

$$v(d) = \sqrt{2a_s d + (v_i)^2}, \quad (A.10)$$

¹Une amplitude de ϕ_{sdec} supérieure à π signifie que la vitesse angulaire maximale ω_{max} ne peut être atteinte.

qui correspond à la loi de vitesse recherchée pour $d < d_{sdec}$. La distance critique à partir de laquelle la décélération débute, d_{sdec} , est obtenue en posant $v = v_{max}$ dans (A.10) :

$$d_{sdec}(v_i) = \frac{v_{max}^2 - (v_i)^2}{2 \cdot a_s}, \quad (\text{A.11})$$

qui est définie strictement positive puisque $|v_i| \leq v_{max}$.

En somme, la loi de contrôle recherchée à l'instant k est la suivante :

$$v_k^*(\phi_k, d_k, v_i, m_i) = \begin{cases} v_{max} \cdot m_i & d_k \geq d_{sdec} \\ m_i \cdot \sqrt{2d_k a_s + (v_i)^2} & d_k < d_{sdec} \end{cases}. \quad (\text{A.12})$$

A.3 Rayons de divergence selon l'écart de configuration

On cherche les valeurs de d_k et ϕ_k pour lesquelles les deux conditions de divergence soient satisfaites.

A- ($d_k > d_{sdec}$) **et** ($|\phi_k| < \phi_{sdec}$) La valeur absolue du rayon de courbure est :

$$|r_k|^A = \frac{v_{max}}{(1 + |\beta \phi_k|^\lambda) \sqrt{2\phi_k \alpha_s}} \quad (\text{A.13})$$

On observe que l'inégalité (3.11) est satisfaite pour $d_k = 0$ jusqu'à la valeur maximale de $|r_k|^A$, laquelle est obtenue avec une valeur minimale de $|\phi_k|$ correspondant à $\pi/2$ pour respecter la première condition de divergence (3.10). Supposons $(r_i^{lim})^A$ la valeur maximale de $|r_k|^A$ pour un même β , on a :

$$(r_i^{lim})^A = \frac{v_{max}}{(1 + |\beta \pi/2|^\lambda) \sqrt{\pi \alpha_s}} \quad (\text{A.14})$$

Ce rayon de divergence est borné tel que :

$$(r_i^{lim})^A \leq \frac{v_{max}}{\sqrt{\pi \alpha_s}} \quad (\text{A.15})$$

B- ($d_k > d_{sdec}$) **et** ($|\phi_k| > \phi_{sdec}$) La valeur absolue du rayon de courbure est :

$$|r_k|^B = \frac{v_{max}}{(1 + |\beta \phi_k|^\lambda) \omega_{max}} \quad (\text{A.16})$$

qui sera aussi de valeur maximale en $\phi = \pi/2$, d'où le rayon de divergence suivant :

$$(r_i^{lim})^B = \frac{v_{max}}{(1 + |\beta \pi/2|^\lambda) \omega_{max}} \quad (\text{A.17})$$

Ce rayon de divergence est borné comme suit (en posant $\beta = 0$) :

$$(r_i^{lim})^B \leq \frac{v_{max}}{\omega_{max}}. \quad (\text{A.18})$$

C- ($d_k < d_{sdec}$) **et** ($|\phi_k| < \phi_{sdec}$) La valeur maximale du rayon de courbure étant toujours à $\pi/2$, la distance maximale d_k où l'instabilité peut survenir s'obtient en posant :

$$d_k = \frac{\sqrt{2d_k a_s + (v_i)^2}}{(1 + |\beta\pi/2|^\lambda) \sqrt{\pi\alpha_s}}, \quad (\text{A.19})$$

soit une équation quadratique dont la seule solution possible est :

$$(r_i^{lim})^C = \frac{a_s + \sqrt{a_s^2 + (1 + |\beta\pi/2|^\lambda)^2 (\pi\alpha_s)(v_i)^2}}{(1 + |\beta\pi/2|^\lambda)^2 (\pi\alpha_s)}, \quad (\text{A.20})$$

étant donné que $(r_i^{lim})^C \geq 0$.

Cette expression indique que le rayon de divergence est borné tel que :

$$(r_i^{lim})^C \leq \frac{a_s + \sqrt{a_s^2 + \pi\alpha_s v_i^2}}{\pi\alpha_s}. \quad (\text{A.21})$$

D- ($d_k < d_{sdec}$) **et** ($|\phi_k| < \phi_{sdec}$) De manière analogue au développement précédent, le rayon maximal de divergence est :

$$(r_i^{lim})^D = \frac{a_s + \sqrt{a_s^2 + (1 + |\beta\pi/2|^\lambda)^2 \omega_{max}^2 (v_i)^2}}{(1 + |\beta\pi/2|^\lambda)^2 \omega_{max}^2}, \quad (\text{A.22})$$

et le rayon de divergence est borné comme suit :

$$(r_i^{lim})^D \leq \frac{a_s + \sqrt{a_s^2 + \omega_{max}^2 v_i^2}}{\omega_{max}}. \quad (\text{A.23})$$

A.4 Identification du rayon de divergence

L'algorithme 2 permet d'identifier le rayon maximal de divergence r_i^{lim} en fonction des paramètres d_{sdec} et ϕ_{sdec} . Puisque la vitesse linéaire ne peut que diminuer lors de l'approche du point de passage, le rayon maximal $(r_i^{lim})^C$ sera nécessairement inférieur ou égal à $(r_i^{lim})^A$ et le rayon

$(r_i^{lim})^D$ inférieur ou égal à $(r_i^{lim})^B$:

$$(r_i^{lim})^C \leq (r_i^{lim})^A \quad (\text{A.24})$$

$$(r_i^{lim})^D \leq (r_i^{lim})^B, \quad (\text{A.25})$$

ce qui permet de conclure directement, dans l'algorithme, que $((r_i^{lim})^C < d_{sdec})$ si $((r_i^{lim})^A < d_{sdec})$ et $((r_i^{lim})^D < d_{sdec})$ si $((r_i^{lim})^B < d_{sdec})$.

Algorithme 2 Estimation du rayon maximal de divergence en fonction de d_{sdec} et ϕ_{sdec} .

```

si  $\phi_{sdec} > \pi/2$  alors
  si  $(r_i^{lim})^A > d_{sdec}$  alors
     $r_i^{lim} = (r_i^{lim})^A$ 
  sinon
     $r_i^{lim} = (r_i^{lim})^C$ 
  finsi
sinon
  si  $(r_i^{lim})^B > d_{sdec}$  alors
     $r_i^{lim} = (r_i^{lim})^B$ 
  sinon
     $r_i^{lim} = (r_i^{lim})^D$ 
  finsi
finsi

```

A.5 Calcul du coefficient de décroissance minimal en fonction d'un écart de configuration

A- ($d_k > d_{sdec}$) **et** ($|\phi_k| < \phi_{sdec}$) En isolant β dans l'expression (A.14), on trouve :

$$\beta = \frac{2}{\pi} \sqrt[3]{\frac{v_{max}}{(r_i^{lim})^A \sqrt{\pi \alpha_s}} - 1}. \quad (\text{A.26})$$

Ainsi, la précision recherchée r sera toujours respectée pour une valeur de β minimale correspondant à :

$$\beta_s = \begin{cases} 0+ & r_i > \max \{ (r_i^{lim})^A \} \\ \frac{2}{\pi} \sqrt[3]{\frac{v_{max}}{r_i \sqrt{\pi \alpha_s}} - 1} & \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{A.27})$$

B- ($d_k > d_{sdec}$) **et** ($|\phi_k| > \phi_{sdec}$) Par analogie à la solution précédente, la précision recherchée r exige une valeur minimale du coefficient de décroissance β correspondant à :

$$\beta_s = \begin{cases} 0+ & r_i > \max \{ (r_i^{lim})^B \} \\ \frac{2}{\pi} \lambda \sqrt{\frac{v_{max}}{r_i \Omega_{max}}} - 1 & \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{A.28})$$

C- ($d_k < d_{sdec}$) **et** ($|\phi_k| < \phi_{sdec}$) Supposons la variable u telle que :

$$u = \left(1 + |\beta \pi / 2|^\lambda \right)^2 (\pi a_s), \quad (\text{A.29})$$

l'équation (A.20) se réécrit alors sous la forme suivante :

$$((r_i^{lim})^C)^2 u^2 - \left(2(r_i^{lim})^C \alpha_s + (v_i)^2 \right) u = 0, \quad (\text{A.30})$$

soit une équation quadratique dont les solutions sont :

$$u_1 = 0 \quad (\text{A.31})$$

$$u_2 = \frac{2(r_i^{lim})^C a_s + (v_i)^2}{((r_i^{lim})^C)^2}. \quad (\text{A.32})$$

La première solution implique $|\beta \pi / 2|^\lambda = -1$ et n'a donc pas de solution réelle. La deuxième solution conduit à :

$$\beta_{1,2} = \frac{2}{\pi} \lambda \sqrt{\pm \sqrt{\frac{2(r_i^{lim})^C a_s + (v_i)^2}{((r_i^{lim})^C)^2 (\pi \alpha_s)}} - 1} \quad (\text{A.33})$$

La précision recherchée est donc garantie pour une valeur minimale de β correspondant à :

$$\beta_s = \begin{cases} 0+ & r_i > \max \{ (r_i^{lim})^C \} \\ \frac{2}{\pi} \lambda \sqrt{\sqrt{\frac{2r_i \cdot a_s + (v_i)^2}{r_i^2 (\pi \alpha_s)}} - 1} & \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{A.34})$$

D- ($d_k < d_{sdec}$) **et** ($|\phi_k| < \phi_{sdec}$) La précision recherchée est garantie pour une valeur minimale du coefficient de décroissance β égale à :

$$\beta_s = \begin{cases} 0+ & r_i > \max \{ (r_i^{lim})^D \} \\ \frac{2}{\pi} \lambda \sqrt{\sqrt{\frac{2r_i \cdot a_s + (v_i)^2}{r_i^2 (\Omega_{max})}} - 1} & \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{A.35})$$

ANNEXE B

LOCALISATION

Système de localisation externe

Ce système utilise un télémètre laser fixe détectant la partie supérieure de la plate-forme à localiser, qui correspond à la plus petite distance détectée d_k^{min} d'orientation $\phi_k^{(tm)}$.

Ainsi, considérant que le télémètre laser fixe est à la pose $[x^{(tm)}, y^{(tm)}, \theta^{(tm)}]'$, la position $[x_k^{(rob)}, y_k^{(rob)}]'$ de la plate-forme à l'instant k sera :

$$\begin{aligned} x_k^{(rob)} &= x^{(tm)} + d_k^{min} \cos(\theta^{(tm)} + \phi_k^{(tm)}) \\ y_k^{(rob)} &= y^{(tm)} + d_k^{min} \sin(\theta^{(tm)} + \phi_k^{(tm)}) \end{aligned}$$

L'erreur de mesure dépend de la distance entre la plate-forme et le télémètre :

$$\Delta d_k = d_k^{min} \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)$$

où α est l'angle entre chaque faisceau consécutif du laser. Pour nos tests, la distance maximale entre le télémètre et la plate-forme mobile est de 10m, d'où une erreur maximale d'environ 15cm.

ANNEXE C

LISTE DES HABILITÉS TESTÉS DU WST

Les habilités 3 à 5 ne sont pas disponibles sur notre FRMSA. Les habilités 21 à 23 n'ont pas été testées pour la sécurité du matériel.

1. Allumer et éteindre le contrôleur
2. Éloigner et rapprocher le contrôleur
3. Sélectionner les différents modes de conduite et de vitesse
4. Contrôler la bascule
5. Contrôler l'inclinaison du dossier
6. Engager et désengager les moteurs
7. Opérer le chargeur de batteries
8. Ramasser un objet au sol
9. Diminuer la pression sous le siège
10. Avancer de 10 m en ligne droite
11. Avancer de 10 m en 30s
12. Reculer 5m en ligne droite
13. Effectuer un virage de 90° en propulsion avant (droite et gauche)
14. Effectuer un virage de 90° en propulsion arrière (droite et gauche)
15. Tourner de 180 degrés sur place (droite et gauche)
16. Manoeuvrer latéralement (droite et gauche)
17. Se transférer du FR au banc et retourner
18. Se relever du sol au FR
19. Avancer 2m sur une surface molle
20. Franchir un seuil de 2cm d'épaisseur
21. Monter un dénivellement de 5cm
22. Traverser un trou de 15cm
23. Descendre un dénivellement de 5cm
24. Rouler 2 m sur un plan incliné latéral (droit et gauche)

25. Monter un plan incliné à 5 degrés
26. Descendre un plan incliné à 5 degrés
27. Monter un plan incliné à 10 degrés
28. Descendre un plan incliné à 10 degrés
29. Atteindre un objet à une hauteur 1.5 m
30. Franchir une porte dans le deux directions
31. Avancer de 100m
32. Éviter un obstacle mobile (droit et gauche)

ANNEXE D**RÉSULTATS DÉTAILLÉS DES TESTS AVEC LES USAGERS**

Tableau D.1 Statistiques d'exécution du WST par la manette standard du FRM, sans assistance.

| Usager | Habileté | Sécurité | Durée | Accrochages | Effleurements | Interv. prév. | Prox.min.moy. | Prox.min.moy. E-T | Distance lin. | Distance ang. | Vitesse lin.moy. | Vitesse lin.moy.E-T | Vitesse ang.moy. | Vitesse ang.moy.E-T |
|--------|----------|----------|-------|-------------|---------------|---------------|---------------|-------------------|---------------|---------------|------------------|---------------------|------------------|---------------------|
| | % | % | min | nb | nb | nb | m | m | m | rad | m/s | m/s | rad/s | rad/s |
| S1 | 100 | 100 | 18 | 1 | 0 | 0 | 0.34 | 0.32 | 240 | 144 | 0.37 | 0.34 | 0.22 | 0.23 |
| S2 | 100 | 100 | 19 | 0 | 0 | 0 | 0.39 | 0.31 | 223 | 159 | 0.24 | 0.19 | 0.15 | 0.13 |
| S3 | 100 | 100 | 20 | 0 | 2 | 0 | nd | nd | nd | nd | nd | nd | nd | nd |
| S4 | 100 | 100 | 20 | 2 | 0 | 0 | 0.45 | 0.39 | 263 | 175 | 0.34 | 0.30 | 0.23 | 0.21 |
| S5 | 100 | 100 | 23 | 1 | 1 | 0 | 0.44 | 0.41 | 226 | 130 | 0.27 | 0.16 | 0.17 | 0.14 |
| S6 | 100 | 100 | 20 | 4 | 0 | 0 | 0.44 | 0.37 | 271 | 173 | 0.29 | 0.22 | 0.20 | 0.18 |
| S7 | 100 | 100 | 16 | 0 | 3 | 0 | 0.46 | 0.38 | 282 | 195 | 0.33 | 0.30 | 0.24 | 0.25 |
| S8 | 100 | 100 | 22 | 1 | 2 | 0 | 0.37 | 0.30 | 266 | 183 | 0.33 | 0.28 | 0.23 | 0.24 |
| Tot | - | - | 158 | 9 | 8 | 0 | - | - | 1771 | 1159 | - | - | - | - |
| Moy | 100 | 100 | 20 | 1.1 | 1.0 | 0 | 0.41 | 0.35 | 253 | 166 | 0.31 | 0.26 | 0.21 | 0.21 |
| E-T | 0 | 0 | 2 | 1.4 | 1.2 | 0 | 0.05 | 0.04 | 23 | 23 | 0.04 | 0.07 | 0.03 | 0.05 |
| H1 | 96 | 100 | 31 | 1 | 4 | 0 | nd | nd | nd | nd | nd | nd | nd | nd |
| H2 | 76 | 100 | 28 | 1 | 12 | 0 | 0.21 | 0.14 | 278 | 181 | 0.33 | 0.27 | 0.23 | 0.22 |
| H3 | 80 | 100 | 16 | 1 | 1 | 2 | 0.36 | 0.29 | 212 | 123 | 0.42 | 0.31 | 0.26 | 0.26 |
| H4 | 96 | 100 | 24 | 0 | 7 | 0 | 0.19 | 0.14 | 265 | 165 | 0.30 | 0.23 | 0.20 | 0.18 |
| H5 | 76 | 100 | 22 | 0 | 9 | 0 | nd | nd | nd | nd | nd | nd | nd | nd |
| H6 | 88 | 100 | 27 | 0 | 3 | 0 | 0.40 | 0.28 | 284 | 173 | 0.37 | 0.29 | 0.24 | 0.22 |
| H7 | 84 | 100 | 14 | 0 | 5 | 0 | 0.45 | 0.33 | 271 | 182 | 0.48 | 0.38 | 0.33 | 0.31 |
| H8 | 96 | 100 | 31 | 4 | 5 | 0 | 0.44 | 0.36 | 276 | 226 | 0.28 | 0.24 | 0.24 | 0.25 |
| H9 | 84 | 100 | 28 | 2 | 6 | 0 | nd | nd | nd | nd | nd | nd | nd | nd |
| Tot | - | - | 221 | 9 | 52 | 2 | - | - | 1849 | 1229 | - | - | - | - |
| Moy | 86 | 100 | 25 | 1.0 | 5.8 | 0.20 | 0.30 | 0.20 | 264 | 176 | 0.4 | 0.3 | 0.3 | 0.2 |
| E-T | 8 | 0 | 6 | 1.3 | 3.3 | 0.67 | 0.12 | 0.10 | 24 | 30 | 0.07 | 0.05 | 0.04 | 0.04 |
| Tot | - | - | 1576 | 18 | 60 | 2 | - | - | 3620 | 2389 | - | - | - | - |
| Moy | 93 | 100 | 22 | 1.1 | 3.5 | 0.1 | 0.38 | 0.31 | 258 | 170 | 0.34 | 0.27 | 0.23 | 0.22 |
| E-T | 9 | 0 | 5 | 1.3 | 3.5 | 0.5 | 0.1 | 0.09 | 24 | 27 | 0.06 | 0.06 | 0.04 | 0.05 |

Tableau D.2 Distribution de la vitesse linéaire lors de l'exécution du WST par la manette standard du FRM.

| Usager | Inférieures à 0.1 m/s | Entre 0.1 et 0.2 m/s | Entre 0.2 et 0.3 m/s | Entre 0.3 et 0.4 m/s | Entre 0.4 et 0.5 m/s | Entre 0.5 et 0.6 m/s | Entre 0.6 et 0.7 m/s | Supérieures à 0.7 m/s |
|--------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|
| | % | % | % | % | % | % | % | % |
| S1 | 30 | 20 | 14 | 6 | 7 | 4 | 3 | 16 |
| S4 | 30 | 21 | 13 | 6 | 5 | 6 | 7 | 13 |
| S5 | 28 | 19 | 11 | 13 | 28 | 1 | 0 | 1 |
| S7 | 28 | 22 | 14 | 9 | 7 | 3 | 3 | 13 |
| S8 | 31 | 21 | 12 | 8 | 6 | 5 | 6 | 11 |
| Moy | 30 | 19 | 13 | 8 | 8 | 4 | 5 | 13 |
| H2 | 29 | 20 | 14 | 8 | 5 | 5 | 5 | 15 |
| H4 | 33 | 16 | 14 | 11 | 8 | 5 | 7 | 8 |
| H6 | 27 | 17 | 13 | 8 | 6 | 6 | 6 | 17 |
| H7 | 25 | 12 | 15 | 6 | 5 | 5 | 5 | 27 |
| H8 | 35 | 19 | 14 | 9 | 6 | 5 | 4 | 8 |
| Moy | 30 | 17 | 14 | 8 | 6 | 5 | 5 | 15 |
| Moy | 30 | 19 | 13 | 8 | 8 | 4 | 5 | 13 |

Tableau D.3 Distribution de la vitesse angulaire lors de l'exécution du WST par la manette standard du FRM.

| Usager | Inférieures à 0.1 rad/s | Entre 0.1 et 0.2 rad/s | Entre 0.2 et 0.3 rad/s | Entre 0.3 et 0.4 rad/s | Entre 0.4 et 0.5 rad/s | Entre 0.5 et 0.6 rad/s | Supérieures à 0.6 rad/s |
|--------|-------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|
| | % | % | % | % | % | % | % |
| S1 | 46 | 24 | 9 | 5 | 4 | 3 | 8 |
| S3 | 56 | 24 | 9 | 5 | 4 | 2 | 1 |
| S4 | 41 | 24 | 11 | 6 | 5 | 5 | 8 |
| S5 | 51 | 24 | 11 | 7 | 5 | 2 | 1 |
| S7 | 45 | 22 | 10 | 5 | 5 | 4 | 9 |
| S8 | 47 | 22 | 9 | 6 | 5 | 3 | 8 |
| Moy | 48 | 23 | 10 | 6 | 5 | 3 | 6 |
| H2 | 43 | 23 | 12 | 7 | 6 | 3 | 6 |
| H4 | 48 | 23 | 11 | 6 | 6 | 4 | 3 |
| H6 | 42 | 23 | 12 | 6 | 5 | 4 | 8 |
| H8 | 35 | 21 | 10 | 6 | 5 | 4 | 19 |
| Moy | 42 | 23 | 11 | 6 | 5 | 4 | 9 |
| Moy | 45 | 23 | 10 | 6 | 5 | 3 | 7 |

Tableau D.4 Résultat du WST des usagers sains avec l'assistance du SNSA selon l'interface de commande utilisée.

| Usager | Interface | Habileté | Sécurité | Durée | Accrochages | Effleurements | Interv. prév. | Prox.min.moy. | Prox.min.moy. E-T | Distance lin. | Distance ang. | Vitesse lin.moy. | Vitesse lin.moy.E-T | Vitesse ang.moy. | Vitesse ang.moy.E-T |
|-------------------|-----------|----------|----------|-------|-------------|---------------|---------------|---------------|-------------------|---------------|---------------|------------------|---------------------|------------------|---------------------|
| | | % | % | min | nb | nb | nb | m | m | m | rad | m/s | m/s | rad/s | rad/s |
| S1 | J | 96 | 96 | 26 | 1 | 0 | 0 | 0.45 | 0.36 | 380 | 269 | 0.26 | 0.19 | 0.18 | 0.17 |
| | V | 100 | 96 | 48 | 1 | 1 | 1 | 0.39 | 0.32 | 272 | 202 | 0.24 | 0.19 | 0.15 | 0.13 |
| | C | 96 | 96 | 35 | 0 | 0 | 0 | 0.35 | 0.28 | 308 | 228 | 0.23 | 0.19 | 0.17 | 0.15 |
| S2 | J | 100 | 100 | 28 | 0 | 0 | 0 | 0.41 | 0.38 | 316 | 205 | 0.23 | 0.18 | 0.15 | 0.13 |
| | V | 92 | 88 | 62 | 2 | 1 | 3 | 0.39 | 0.31 | 223 | 160 | 0.24 | 0.19 | 0.15 | 0.13 |
| | C | 92 | 92 | 34 | 3 | 0 | 2 | 0.36 | 0.30 | 320 | 203 | 0.27 | 0.18 | 0.17 | 0.17 |
| S3 | J | 100 | 100 | 28 | 0 | 0 | 0 | 0.40 | 0.32 | 347 | 240 | 0.23 | 0.19 | 0.16 | 0.13 |
| | V | 92 | 84 | 66 | 3 | 2 | 3 | 0.42 | 0.36 | 275 | 220 | 0.22 | 0.17 | 0.15 | 0.12 |
| | C | 100 | 100 | 33 | 0 | 0 | 1 | 0.34 | 0.26 | 307 | 213 | 0.26 | 0.20 | 0.17 | 0.16 |
| S4 | J | 100 | 96 | 67 | 3 | 0 | 0 | 0.41 | 0.33 | 391 | 308 | 0.22 | 0.16 | 0.17 | 0.14 |
| | V | 88 | 76 | 62 | 4 | 1 | 2 | 0.39 | 0.35 | 274 | 267 | 0.20 | 0.16 | 0.16 | 0.14 |
| | C | 100 | 100 | 30 | 0 | 0 | 0 | 0.37 | 0.30 | 268 | 212 | 0.27 | 0.19 | 0.19 | 0.17 |
| S5 | J | 96 | 96 | 25 | 1 | 0 | 1 | 0.34 | 0.26 | 311 | 197 | 0.25 | 0.18 | 0.16 | 0.15 |
| | V | 92 | 80 | 52 | 6 | 1 | 5 | 0.40 | 0.38 | 287 | 199 | 0.24 | 0.19 | 0.14 | 0.12 |
| | C | 92 | 92 | 42 | 2 | 1 | 1 | nd | nd | nd | nd | nd | nd | nd | nd |
| S6 | V | 92 | 92 | 67 | 2 | 0 | 3 | 0.42 | 0.38 | 270 | 186 | 0.24 | 0.19 | 0.14 | 0.11 |
| | C | 100 | 100 | 36 | 0 | 0 | 0 | nd | nd | nd | nd | nd | nd | nd | nd |
| S7 | J | 96 | 96 | 26 | 1 | 1 | 1 | 0.37 | 0.31 | 318 | 209 | 0.24 | 0.19 | 0.14 | 0.11 |
| | V | 96 | 88 | 60 | 4 | 1 | 4 | 0.39 | 0.33 | 338 | 278 | 0.21 | 0.18 | 0.15 | 0.14 |
| | C | 100 | 100 | 24 | 0 | 0 | 0 | 0.44 | 0.35 | 278 | 232 | 0.27 | 0.19 | 0.21 | 0.20 |
| S8 | J | 100 | 96 | 25 | 0 | 0 | 1 | 0.39 | 0.30 | 319 | 239 | 0.25 | 0.18 | 0.18 | 0.16 |
| | V | 100 | 100 | 64 | 1 | 1 | 0 | 0.36 | 0.33 | 335 | 257 | 0.23 | 0.17 | 0.15 | 0.12 |
| | C | 96 | 100 | 35 | 0 | 1 | 0 | 0.41 | 0.34 | 299 | 240 | 0.26 | 0.20 | 0.19 | 0.18 |
| Tot Moy E-T | J | - | - | 225 | 6 | 1 | 3 | - | - | 2382 | 1666 | - | - | - | - |
| | J | 98 | 97 | 32 | 0.9 | 0.1 | 0.4 | 0.39 | 0.32 | 340 | 238 | 0.24 | 0.18 | 0.17 | 0.15 |
| | J | 2 | 2 | 15 | 1.1 | 0.4 | 0.5 | 0.03 | 0.04 | 33 | 40 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.02 |
| Tot Moy E-T | V | - | - | 481 | 23 | 8 | 21 | - | - | 2273 | 1735 | - | - | - | - |
| | V | 94 | 88 | 60 | 2.9 | 1.0 | 2.6 | 0.40 | 0.35 | 284 | 221 | 0.23 | 0.18 | 0.15 | 0.12 |
| | V | 4 | 8 | 7 | 1.7 | 0.5 | 1.6 | 0.02 | 0.02 | 37 | 42 | 0.02 | 0.02 | 0.01 | 0.02 |
| Tot Moy E-T | C | - | - | 269 | 5 | 2 | 4 | - | - | 1780 | 1329 | - | - | - | - |
| | C | 97 | 98 | 34 | 0.6 | 0.3 | 0.5 | 0.38 | 0.31 | 297 | 221 | 0.26 | 0.19 | 0.18 | 0.17 |
| | C | 4 | 4 | 5 | 1.2 | 0.5 | 0.8 | 0.04 | 0.04 | 20 | 14 | 0.02 | 0.01 | 0.02 | 0.02 |
| Tot Moy E-T | - | - | - | 975 | 34 | 11 | 28 | - | - | 6436 | 4762 | - | - | - | - |
| | - | 97 | 94 | 42 | 1.5 | 0.5 | 1.2 | 0.40 | 0.34 | 306 | 227 | 0.24 | 0.18 | 0.16 | 0.15 |
| | - | 4 | 7 | 16 | 1.7 | 0.6 | 1.5 | 0.03 | 0.03 | 39 | 35 | 0.02 | 0.01 | 0.02 | 0.02 |

Tableau D.5 Résultat du WST des usagers handicapés avec l'assistance du SNSA avec la commande vocale.

| Usager | Habilité | Sécurité | Temps | Accrochage | Effleurement | Interventions préventives | Proximité min.moy. | Proximité min.moy. E-T | Distance lin. parcourue | Distance ang. parcourue | Vitesse lin.moy. | Vitesse lin.moy.E-T | Vitesse ang.moy. | Vitesse ang.moy.E-T |
|--------|----------|----------|-------|------------|--------------|---------------------------|--------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------|---------------------|------------------|---------------------|
| | % | % | min | nb | nb | nb | m | m | m | rad | m/s | m/s | rad/s | rad/s |
| H1 | 84 | 80 | 75 | 1 | 0 | 5 | 0.29 | 0.25 | 294 | 205 | 0.25 | 0.19 | 0.16 | 0.13 |
| H2 | 64 | 84 | 79 | 1 | 4 | 3 | 0.23 | 0.19 | 370 | 289 | 0.21 | 0.17 | 0.15 | 0.13 |
| H3 | 76 | 80 | 77 | 2 | 0 | 6 | 0.23 | 0.24 | 301 | 224 | 0.25 | 0.19 | 0.16 | 0.13 |
| H4 | 92 | 92 | 75 | 0 | 0 | 0 | 0.31 | 0.27 | 285 | 207 | 0.23 | 0.18 | 0.16 | 0.14 |
| H5 | 76 | 92 | 50 | 0 | 0 | 1 | 0.29 | 0.26 | 290 | 224 | 0.26 | 0.20 | 0.18 | 0.15 |
| H6 | 84 | 100 | 41 | 1 | 1 | 0 | 0.34 | 0.30 | 276 | 197 | 0.26 | 0.19 | 0.17 | 0.14 |
| H7 | 84 | 96 | 41 | 2 | 0 | 1 | 0.30 | 0.25 | 278 | 217 | 0.26 | 0.19 | 0.18 | 0.15 |
| H8 | 96 | 84 | 84 | 0 | 0 | 2 | 0.32 | 0.26 | 287 | 185 | 0.24 | 0.18 | 0.14 | 0.11 |
| H9 | 80 | 80 | 54 | 3 | 1 | 4 | 0.30 | 0.22 | 312 | 234 | 0.25 | 0.19 | 0.17 | 0.14 |
| Tot | - | - | 522 | 7 | 5 | 18 | - | - | 2381 | 1749 | - | - | - | - |
| Moy | 82 | 89 | 65 | 0.9 | 0.6 | 2.3 | 0.29 | 0.25 | 298 | 219 | 0.25 | 0.19 | 0.16 | 0.13 |
| E-T | 10 | 8 | 18 | 0.8 | 1.4 | 2.3 | 0.04 | 0.03 | 30 | 32 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |

Tableau D.6 Distribution de la vitesse linéaire lors de l'exécution du WST à l'aide du SNSA.

| Usager | Inférieures à 0.1 m/s | Entre 0.1 et 0.2 m/s | Entre 0.2 et 0.3 m/s | Entre 0.3 et 0.4 m/s | Entre 0.4 et 0.5 m/s | Entre 0.5 et 0.6 m/s | Entre 0.6 et 0.7 m/s | Supérieures à 0.7 m/s |
|--------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|
| | % | % | % | % | % | % | % | % |
| S1 | 46 | 15 | 11 | 10 | 7 | 6 | 4 | 1 |
| S2 | 34 | 19 | 15 | 13 | 8 | 5 | 5 | 1 |
| S3 | 46 | 17 | 12 | 10 | 7 | 4 | 4 | 1 |
| S4 | 45 | 19 | 12 | 10 | 7 | 4 | 2 | 0 |
| S5 | 42 | 18 | 14 | 10 | 6 | 4 | 5 | 1 |
| S6 | 52 | 13 | 11 | 10 | 7 | 4 | 3 | 0 |
| S7 | 46 | 20 | 11 | 10 | 6 | 4 | 3 | 1 |
| S8 | 46 | 15 | 12 | 10 | 8 | 6 | 3 | 1 |
| Moy | 43 | 17 | 12 | 10 | 7 | 5 | 4 | 1 |
| H1 | 43 | 16 | 10 | 11 | 10 | 7 | 2 | 1 |
| H2 | 51 | 20 | 12 | 8 | 5 | 2 | 1 | 1 |
| H3 | 46 | 15 | 10 | 11 | 9 | 6 | 2 | 1 |
| H4 | 47 | 17 | 9 | 9 | 10 | 6 | 2 | 1 |
| H5 | 45 | 14 | 9 | 11 | 11 | 6 | 3 | 2 |
| H6 | 44 | 14 | 9 | 11 | 10 | 8 | 2 | 1 |
| H7 | 64 | 18 | 8 | 7 | 2 | 1 | 1 | 0 |
| H8 | 44 | 15 | 11 | 11 | 10 | 6 | 2 | 1 |
| H9 | 44 | 15 | 12 | 11 | 10 | 6 | 2 | 0 |
| Moy | 48 | 16 | 10 | 10 | 9 | 5 | 2 | 1 |
| Moy | 46 | 16 | 11 | 10 | 8 | 5 | 3 | 1 |

Tableau D.7 Distribution de la vitesse angulaire lors de l'exécution du WST à l'aide du SNSA.

| Usager | Inférieures à 0.1 rad/s | Entre 0.1 et 0.2 rad/s | Entre 0.2 et 0.3 rad/s | Entre 0.3 et 0.4 rad/s | Entre 0.4 et 0.5 rad/s | Entre 0.5 et 0.6 rad/s | Supérieures à 0.6 rad/s |
|--------|-------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|
| | % | % | % | % | % | % | % |
| S1 | 52 | 25 | 10 | 5 | 4 | 3 | 2 |
| S2 | 56 | 25 | 9 | 4 | 3 | 2 | 2 |
| S3 | 53 | 26 | 10 | 4 | 3 | 2 | 1 |
| S4 | 48 | 26 | 11 | 6 | 4 | 3 | 2 |
| S5 | 54 | 27 | 9 | 4 | 3 | 2 | 1 |
| S6 | 55 | 27 | 10 | 4 | 2 | 1 | 0 |
| S7 | 50 | 26 | 11 | 5 | 4 | 3 | 2 |
| S8 | 50 | 26 | 10 | 5 | 4 | 3 | 3 |
| Moy | 52 | 26 | 10 | 5 | 3 | 2 | 2 |
| Hand 1 | 48 | 28 | 12 | 6 | 4 | 2 | 1 |
| Hand 2 | 48 | 28 | 12 | 5 | 4 | 2 | 2 |
| Hand 3 | 47 | 28 | 13 | 6 | 4 | 2 | 1 |
| Hand 4 | 51 | 28 | 10 | 4 | 3 | 2 | 1 |
| Hand 5 | 45 | 28 | 12 | 6 | 4 | 3 | 2 |
| Hand 6 | 48 | 27 | 11 | 6 | 4 | 2 | 1 |
| Hand 7 | 39 | 28 | 15 | 9 | 6 | 2 | 1 |
| Hand 8 | 45 | 27 | 12 | 6 | 5 | 3 | 2 |
| Hand 9 | 51 | 30 | 11 | 4 | 3 | 1 | 0 |
| Moy | 50 | 27 | 11 | 5 | 4 | 2 | 1 |
| Moy | 49 | 27 | 11 | 5 | 4 | 2 | 1 |

Tableau D.8 Statistiques de la fonctionnalité de commande continue assistée.

| Usager | Nombre d'utilisation | Durée moy. | Vitesse lin.moy. | Vitesse lin.moy.E-T | Vitesse ang.moy. | Vitesse ang.moy.E-T | Proximité min.moy. | Proximité min.moy.E-T |
|--------|----------------------|------------|------------------|---------------------|------------------|---------------------|--------------------|-----------------------|
| | <i>nb</i> | <i>sec</i> | <i>m/s</i> | <i>m/s</i> | <i>rad/s</i> | <i>rad/s</i> | <i>m</i> | <i>m</i> |
| S1 | 47 | 41 | 0.22 | 0.13 | 0.16 | 0.08 | 0.43 | 0.26 |
| S2 | 45 | 47 | 0.18 | 0.10 | 0.12 | 0.06 | 0.35 | 0.21 |
| S3 | 40 | 57 | 0.20 | 0.09 | 0.13 | 0.06 | 0.37 | 0.20 |
| S4 | 40 | 91 | 0.17 | 0.08 | 0.16 | 0.08 | 0.45 | 0.29 |
| S5 | 50 | 32 | 0.22 | 0.12 | 0.13 | 0.09 | 0.40 | 0.25 |
| S6 | 5 | 30 | 0.19 | 0.12 | 0.11 | 0.06 | 0.34 | 0.25 |
| S7 | 50 | 31 | 0.19 | 0.11 | 0.14 | 0.09 | 0.33 | 0.24 |
| S8 | 38 | 84 | 0.19 | 0.08 | 0.16 | 0.08 | 0.39 | 0.21 |
| Tot | 315 | 52 | 0.19 | 0.10 | 0.14 | 0.07 | 0.38 | 0.24 |

Tableau D.9 Statistiques de la fonctionnalité de traversée de passages étroits.

| Usager | Nombre d'appels | | Nombre d'annulations | Durée moy. | Vitesse lin.moy. | Vitesse lin.moy.E-T | Vitesse ang.moy. | Vitesse ang.moy.E-T | Proximité min.moy. | Proximité min.moy.E-T |
|--------|-----------------|-----------|----------------------|------------|------------------|---------------------|------------------|---------------------|--------------------|-----------------------|
| | <i>nb</i> | <i>nb</i> | | <i>sec</i> | <i>m/s</i> | <i>m/s</i> | <i>rad/s</i> | <i>rad/s</i> | <i>m</i> | <i>m</i> |
| S1 | 19 | 2 | | 11 | 0.36 | 0.07 | 0.07 | 0.01 | 0.26 | 0.10 |
| S2 | 12 | 0 | | 13 | 0.32 | 0.10 | 0.07 | 0.02 | 0.35 | 0.39 |
| S3 | 9 | 0 | | 15 | 0.31 | 0.09 | 0.07 | 0.02 | 0.16 | 0.05 |
| S4 | 12 | 0 | | 30 | 0.31 | 0.10 | 0.07 | 0.02 | 0.23 | 0.12 |
| S5 | 10 | 1 | | 14 | 0.29 | 0.09 | 0.06 | 0.04 | 0.24 | 0.18 |
| S6 | 4 | 0 | | 12 | 0.29 | 0.07 | 0.09 | 0.02 | 0.27 | 0.12 |
| S7 | 26 | 3 | | 16 | 0.27 | 0.11 | 0.07 | 0.03 | 0.28 | 0.16 |
| S8 | 26 | 3 | | 20 | 0.34 | 0.12 | 0.07 | 0.03 | 0.25 | 0.13 |
| Tot | 118 | 9 | | 16 | 0.31 | 0.09 | 0.07 | 0.02 | 0.25 | 0.16 |
| H1 | 11 | 0 | | 22 | 0.37 | 0.12 | 0.06 | 0.04 | 0.25 | 0.14 |
| H2 | 15 | 1 | | 30 | 0.29 | 0.12 | 0.07 | 0.02 | 0.24 | 0.11 |
| H3 | 18 | 1 | | 17 | 0.36 | 0.12 | 0.07 | 0.03 | 0.29 | 0.16 |
| H4 | 11 | 0 | | 26 | 0.33 | 0.13 | 0.09 | 0.04 | 0.34 | 0.18 |
| H5 | 16 | 3 | | 23 | 0.32 | 0.11 | 0.07 | 0.04 | 0.26 | 0.12 |
| H6 | 7 | 0 | | 34 | 0.41 | 0.06 | 0.08 | 0.01 | 0.33 | 0.15 |
| H7 | 9 | 1 | | 32 | 0.39 | 0.08 | 0.08 | 0.02 | 0.31 | 0.13 |
| H8 | 15 | 3 | | 22 | 0.38 | 0.07 | 0.08 | 0.01 | 0.37 | 0.15 |
| H9 | 11 | 1 | | 23 | 0.35 | 0.12 | 0.08 | 0.01 | 0.29 | 0.12 |
| Tot | 113 | 10 | | 25 | 0.35 | 0.10 | 0.08 | 0.02 | 0.30 | 0.14 |
| Tot | 231 | 19 | | 21 | 0.33 | 0.10 | 0.07 | 0.02 | 0.28 | 0.15 |

Tableau D.10 Statistiques de la fonctionnalité de stationnement.

| Usager | Nombre d'appels | | Nombre d'annulations | Durée moy. | Vitesse lin.moy.E-T | | Vitesse ang.moy.E-T | | Proximité min.moy. | Proximité min.moy.E-T |
|--------|-----------------|-----------|----------------------|------------|---------------------|--------------|---------------------|----------|--------------------|-----------------------|
| | <i>nb</i> | <i>nb</i> | <i>sec</i> | <i>m/s</i> | <i>m/s</i> | <i>rad/s</i> | <i>rad/s</i> | <i>m</i> | <i>m</i> | |
| S1 | 16 | 7 | 40 | 0.16 | 0.02 | 0.05 | 0.03 | 0.15 | 0.04 | |
| S2 | 16 | 5 | 28 | 0.13 | 0.05 | 0.06 | 0.03 | 0.14 | 0.04 | |
| S3 | 20 | 6 | 28 | 0.14 | 0.05 | 0.06 | 0.03 | 0.19 | 0.16 | |
| S4 | 25 | 9 | 30 | 0.16 | 0.02 | 0.06 | 0.04 | 0.22 | 0.09 | |
| S5 | 6 | 2 | 56 | 0.16 | 0.03 | 0.06 | 0.02 | 0.22 | 0.15 | |
| S6 | 6 | 1 | 19 | 0.14 | 0.05 | 0.06 | 0.02 | 0.12 | 0.05 | |
| S7 | 18 | 10 | 37 | 0.16 | 0.03 | 0.07 | 0.04 | 0.20 | 0.10 | |
| S8 | 17 | 10 | 47 | 0.14 | 0.13 | 0.06 | 0.03 | 0.21 | 0.08 | |
| Tot | 124 | 50 | 36 | 0.15 | 0.05 | 0.06 | 0.03 | 0.18 | 0.09 | |
| H1 | 6 | 2 | 55 | 0.20 | 0.04 | 0.06 | 0.03 | 0.23 | 0.07 | |
| H2 | 10 | 8 | 57 | 0.14 | 0 | 0.09 | 0.01 | 0.18 | 0.02 | |
| H3 | 9 | 5 | 22 | 0.19 | 0.02 | 0.10 | 0.04 | 0.20 | 0.06 | |
| H4 | 6 | 1 | 46 | 0.20 | 0.03 | 0.05 | 0.02 | 0.18 | 0.04 | |
| H5 | 16 | 7 | 21 | 0.10 | 0.06 | 0.09 | 0.07 | 0.21 | 0.08 | |
| H6 | 2 | 0 | 57 | 0.16 | 0 | 0.07 | 0.01 | 0.18 | 0.06 | |
| H7 | 7 | 3 | 39 | 0.19 | 0.02 | 0.06 | 0.03 | 0.16 | 0.05 | |
| H8 | 7 | 3 | 26 | 0.14 | 0.02 | 0.06 | 0.04 | 0.14 | 0.04 | |
| H9 | 7 | 4 | 26 | 0.16 | 0.03 | 0.08 | 0.04 | 0.19 | 0.04 | |
| Tot | 70 | 33 | 39 | 0.17 | 0.03 | 0.07 | 0.03 | 0.19 | 0.05 | |
| Tot | 194 | 83 | 37 | 0.16 | 0.03 | 0.07 | 0.03 | 0.18 | 0.07 | |

Tableau D.11 Statistiques de la fonctionnalité de pivotement.

| Usager | Nombre d'appels | Nombre d'annulations | Durée moy. | Vitesse lin.moy. | Vitesse lin.moy.E-T | Vitesse ang.moy. | Vitesse ang.moy.E-T | Proximité min.moy. | Proximité min.moy.E-T |
|--------|-----------------|----------------------|------------|------------------|---------------------|------------------|---------------------|--------------------|-----------------------|
| | <i>nb</i> | <i>nb</i> | <i>sec</i> | <i>m/s</i> | <i>m/s</i> | <i>rad/s</i> | <i>rad/s</i> | <i>m</i> | <i>m</i> |
| S1 | 81 | 9 | 12 | 0.04 | 0.01 | 0.12 | 0.07 | 0.48 | 0.28 |
| S2 | 72 | 10 | 15 | 0.05 | 0.04 | 0.12 | 0.09 | 0.41 | 0.36 |
| S3 | 84 | 2 | 15 | 0.04 | 0.02 | 0.09 | 0.07 | 0.53 | 0.35 |
| S4 | 94 | 21 | 10 | 0.05 | 0.03 | 0.16 | 0.08 | 0.50 | 0.35 |
| S5 | 70 | 1 | 18 | 0.05 | 0.04 | 0.11 | 0.09 | 0.56 | 0.45 |
| S6 | 90 | 7 | 14 | 0.06 | 0.05 | 0.10 | 0.07 | 0.49 | 0.36 |
| S7 | 105 | 12 | 12 | 0.06 | 0.05 | 0.13 | 0.09 | 0.43 | 0.35 |
| S8 | 69 | 10 | 20 | 0.04 | 0.02 | 0.11 | 0.08 | 0.48 | 0.31 |
| Tot | 665 | 72 | 14 | 0.05 | 0.03 | 0.12 | 0.08 | 0.48 | 0.35 |
| H1 | 38 | 9 | 14 | 0.04 | 0.02 | 0.15 | 0.10 | 0.46 | 0.39 |
| H2 | 70 | 9 | 14 | 0.04 | 0.02 | 0.09 | 0.07 | 0.26 | 0.18 |
| H3 | 44 | 6 | 10 | 0.04 | 0.02 | 0.19 | 0.10 | 0.27 | 0.27 |
| H4 | 41 | 8 | 13 | 0.04 | 0.02 | 0.16 | 0.11 | 0.44 | 0.36 |
| H5 | 45 | 6 | 12 | 0.04 | 0.02 | 0.11 | 0.07 | 0.43 | 0.33 |
| H6 | 42 | 4 | 24 | 0.06 | 0.05 | 0.12 | 0.08 | 0.44 | 0.29 |
| H7 | 48 | 8 | 11 | 0.05 | 0.03 | 0.18 | 0.11 | 0.46 | 0.30 |
| H8 | 55 | 11 | 11 | 0.04 | 0.02 | 0.10 | 0.08 | 0.36 | 0.23 |
| H9 | 46 | 7 | 16 | 0.04 | 0.03 | 0.16 | 0.10 | 0.36 | 0.21 |
| Tot | 429 | 68 | 14 | 0.04 | 0.02 | 0.14 | 0.09 | 0.38 | 0.29 |
| Tot | 1094 | 140 | 14 | 0.05 | 0.03 | 0.13 | 0.09 | 0.43 | 0.32 |

Tableau D.12 Statistiques de la fonctionnalité de mouvements rectilignes.

| Usager | Nombre d'appels | | | | | | | | |
|--------|-----------------|-----------|------------|------------|------------|--------------|--------------|----------|----------|
| | <i>nb</i> | <i>nb</i> | <i>sec</i> | <i>m/s</i> | <i>m/s</i> | <i>rad/s</i> | <i>rad/s</i> | <i>m</i> | <i>m</i> |
| S1 | 78 | 3 | 13 | 0.28 | 0.13 | 0.05 | 0.02 | 0.40 | 0.27 |
| S2 | 73 | 1 | 10 | 0.34 | 0.13 | 0.05 | 0.02 | 0.39 | 0.24 |
| S3 | 101 | 0 | 14 | 0.26 | 0.13 | 0.05 | 0.02 | 0.48 | 0.28 |
| S4 | 89 | 5 | 10 | 0.25 | 0.12 | 0.06 | 0.03 | 0.40 | 0.30 |
| S5 | 76 | 2 | 16 | 0.29 | 0.13 | 0.05 | 0.03 | 0.53 | 0.41 |
| S6 | 89 | 0 | 10 | 0.26 | 0.13 | 0.05 | 0.02 | 0.52 | 0.36 |
| S7 | 112 | 3 | 9 | 0.32 | 0.13 | 0.05 | 0.03 | 0.44 | 0.28 |
| S8 | 75 | 1 | 13 | 0.27 | 0.12 | 0.05 | 0.02 | 0.45 | 0.30 |
| Tot | 693 | 15 | 12 | 0.28 | 0.13 | 0.05 | 0.02 | 0.45 | 0.30 |
| H1 | 45 | 0 | 9 | 0.24 | 0.10 | 0.06 | 0.02 | 0.37 | 0.29 |
| H2 | 54 | 3 | 13 | 0.23 | 0.11 | 0.05 | 0.03 | 0.24 | 0.16 |
| H3 | 38 | 0 | 11 | 0.22 | 0.12 | 0.06 | 0.03 | 0.22 | 0.19 |
| H4 | 35 | 0 | 12 | 0.21 | 0.14 | 0.06 | 0.02 | 0.36 | 0.23 |
| H5 | 33 | 3 | 11 | 0.27 | 0.12 | 0.06 | 0.06 | 0.29 | 0.22 |
| H6 | 41 | 1 | 13 | 0.25 | 0.11 | 0.05 | 0.02 | 0.35 | 0.26 |
| H7 | 32 | 0 | 10 | 0.27 | 0.11 | 0.08 | 0.04 | 0.23 | 0.18 |
| H8 | 34 | 1 | 9 | 0.25 | 0.14 | 0.05 | 0.02 | 0.38 | 0.28 |
| H9 | 46 | 1 | 8 | 0.28 | 0.12 | 0.06 | 0.04 | 0.31 | 0.19 |
| Tot | 358 | 9 | 11 | 0.25 | 0.12 | 0.06 | 0.03 | 0.30 | 0.22 |
| Tot | 1051 | 24 | 11 | 0.26 | 0.12 | 0.05 | 0.03 | 0.37 | 0.26 |

Tableau D.13 Statistiques de la fonctionnalité de suivi de murs.

| Usager | Nombre d'appels | | Nombre d'annulations | Durée moy. | Vitesse lin.moy. | | Vitesse lin.moy.E-T | Vitesse ang.moy. | | Vitesse ang.moy.E-T | Proximité min.moy. | Proximité min.moy.E-T |
|--------|-----------------|-----------|----------------------|------------|------------------|--------------|---------------------|------------------|----------|---------------------|--------------------|-----------------------|
| | <i>nb</i> | <i>nb</i> | <i>sec</i> | <i>m/s</i> | <i>m/s</i> | <i>rad/s</i> | <i>rad/s</i> | <i>m</i> | <i>m</i> | | | |
| S1 | 45 | 1 | 22 | 0.32 | 0.11 | 0.08 | 0.03 | 0.30 | 0.12 | | | |
| S2 | 44 | 3 | 15 | 0.29 | 0.10 | 0.07 | 0.03 | 0.26 | 0.13 | | | |
| S3 | 45 | 2 | 15 | 0.29 | 0.11 | 0.08 | 0.04 | 0.29 | 0.13 | | | |
| S4 | 33 | 0 | 28 | 0.29 | 0.05 | 0.07 | 0.03 | 0.31 | 0.15 | | | |
| S5 | 36 | 1 | 25 | 0.32 | 0.12 | 0.07 | 0.03 | 0.29 | 0.15 | | | |
| S6 | 14 | 0 | 18 | 0.32 | 0.07 | 0.07 | 0.03 | 0.29 | 0.10 | | | |
| S7 | 56 | 2 | 16 | 0.29 | 0.11 | 0.08 | 0.04 | 0.26 | 0.12 | | | |
| S8 | 25 | 2 | 28 | 0.30 | 0.10 | 0.08 | 0.04 | 0.29 | 0.11 | | | |
| Tot | 298 | 11 | 21 | 0.30 | 0.09 | 0.07 | 0.03 | 0.29 | 0.12 | | | |
| H1 | 13 | 0 | 9 | 0.36 | 0.12 | 0.07 | 0.04 | 0.29 | 0.14 | | | |
| H2 | 18 | 1 | 12 | 0.29 | 0.09 | 0.08 | 0.07 | 0.24 | 0.04 | | | |
| H3 | 18 | 0 | 13 | 0.25 | 0.11 | 0.06 | 0.04 | 0.12 | 0.10 | | | |
| H4 | 10 | 1 | 9 | 0.37 | 0.09 | 0.06 | 0.02 | 0.33 | 0.26 | | | |
| H5 | 18 | 1 | 15 | 0.32 | 0.10 | 0.06 | 0.04 | 0.33 | 0.17 | | | |
| H6 | 8 | 1 | 11 | 0.34 | 0.08 | 0.09 | 0.02 | 0.21 | 0.06 | | | |
| H7 | 8 | 2 | 13 | 0.24 | 0.11 | 0.05 | 0.03 | 0.24 | 0.11 | | | |
| H8 | 12 | 1 | 13 | 0.32 | 0.16 | 0.06 | 0.05 | 0.22 | 0.13 | | | |
| H9 | 15 | 0 | 13 | 0.34 | 0.08 | 0.06 | 0.04 | 0.26 | 0.11 | | | |
| Tot | 120 | 7 | 12 | 0.31 | 0.10 | 0.07 | 0.04 | 0.25 | 0.12 | | | |
| Tot | 418 | 18 | 16 | 0.31 | 0.10 | 0.07 | 0.04 | 0.27 | 0.12 | | | |

Tableau D.14 Statistiques de la fonctionnalité de suivi de personnes.

| Usager | Nombre d'appels | | Nombre d'annulations | Durée moy. | Vitesse lin.moy. | | Vitesse lin.moy.E-T | | Vitesse ang.moy. | | Vitesse ang.moy.E-T | | Proximité min.moy. | Proximité min.moy.E-T |
|--------|-----------------|-----------|----------------------|------------|------------------|--------------|---------------------|--|------------------|--|---------------------|--|--------------------|-----------------------|
| | <i>nb</i> | <i>nb</i> | <i>sec</i> | <i>m/s</i> | <i>m/s</i> | <i>rad/s</i> | <i>rad/s</i> | | | | | | <i>m</i> | <i>m</i> |
| S1 | 1 | 0 | 153 | nd | nd | nd | nd | | | | | | nd | nd |
| H2 | 12 | 2 | 20 | 0.12 | 0.05 | 0.06 | 0.05 | | | | | | 0.20 | 0.12 |
| H3 | 6 | 2 | nd | nd | nd | nd | nd | | | | | | nd | nd |
| H5 | 2 | 1 | 6 | nd | nd | nd | nd | | | | | | nd | nd |
| H6 | 2 | 0 | 31 | 0.15 | 0.03 | 0.17 | 0.04 | | | | | | 0.22 | 0.07 |
| H7 | 3 | 2 | 50 | nd | nd | nd | nd | | | | | | nd | nd |
| H8 | 12 | 4 | 26 | 0.21 | 0.04 | 0.09 | 0.04 | | | | | | 0.37 | 0.13 |
| H9 | 7 | 0 | 27 | 0.15 | 0.05 | 0.09 | 0.03 | | | | | | 0.27 | 0.13 |
| Tot | 48 | 14 | 42 | 0.16 | 0.04 | 0.10 | 0.04 | | | | | | 0.27 | 0.11 |

Tableau D.15 Succès de la manoeuvre de passage de porte du WST.

| Usager | Interface ¹ | Essais | Effleurements | Accrochages | Dysfonctionnements | Échec habilité | Échec sécurité |
|--------|------------------------|--------|---------------|-------------|--------------------|----------------|----------------|
| S1 | j | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | v | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | c | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| S2 | j | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | v | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | c | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| S3 | j | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | v | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | c | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| S4 | j | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | v | 2 | 0 | 2 | 0 | 0 | 2 |
| | c | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| S5 | j | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | v | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | c | 4 | 0 | 0 | 2 | 2 | 0 |
| S6 | v | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | c | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| S7 | j | 4 | 0 | 0 | 2 | 2 | 0 |
| | v | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | c | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| S8 | j | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | v | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | c | 5 | 0 | 0 | 3 | 3 | 0 |
| Tot | - | 53 | 0 | 2 | 7 | 7 | 2 |
| H1 | v | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| H2 | v | 3 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| H3 | v | 2 | 0 | 2 | 0 | 0 | 1 |
| H4 | v | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| H5 | v | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| H6 | v | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| H7 | v | 4 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| H8 | v | 4 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| H9 | v | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Tot | - | 23 | 0 | 3 | 2 | 1 | 3 |
| Tot | - | 76 | 0 | 5 | 9 | 8 | 5 |

Tableau D.16 Succès de la manoeuvre de stationnement du WST.

| Usager | Interface ² | Essais | Effleurements | Accrochages | Dysfonctionnements | Échec habilité | Échec sécurité |
|--------|------------------------|--------|---------------|-------------|--------------------|----------------|----------------|
| S1 | j | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | v | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | c | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| S2 | j | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | v | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | c | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| S3 | j | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | v | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | c | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| S4 | j | 2 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| | v | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | c | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| S5 | j | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | v | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | c | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| S6 | v | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | c | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| S7 | j | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | v | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | c | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| S8 | j | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | v | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | c | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Tot | - | 46 | 4 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| H1 | v | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| H2 | v | 4 | 1 | 0 | 3 | 3 | 0 |
| H3 | v | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| H4 | v | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| H5 | v | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| H6 | v | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| H7 | v | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| H8 | v | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| H9 | v | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Tot | - | 20 | 2 | 0 | 3 | 3 | 0 |
| Tot | - | 66 | 6 | 1 | 3 | 3 | 0 |